DER ÜBERGANGSWIDERSTAND VON KOHLENBÜRSTEN.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

der

Abteilung für Elektrotechnik
der Grossherzogl.-Badischen Technischen Hochschule Karlsruhe

vorgelegt von

MAX KAHN,
Dipl.-Ing. aus Mannheim.

Genehmigt von der Technischen Hochschule Karlsruhe.

Referent: Hofrat Prof. E. ARNOLD.
Korreferent: Prof. Dr. J. TEICHMÜLLER.

STUTTGART.
DRUCK DER UNION DEUTSCHE VERLAGSGESELLSCHAFT.
1902.

Die vorliegende Arbeit ist im elektrotechnischen Institut der technischen Hochschule zu Karlsruhe entstanden. Dass ich mich mit dem behandelten Gegenstande beschäftigt habe, verdanke ich einer Anregung des Herrn Hofrat Prof. E. ARNOLD, der mich auch bei der Durchführung der Versuche stets aufs freundlichste mit seinem Rat unterstützt hat. Ich bin ihm dafür zu grossem Danke verpflichtet.

Karlsruhe, September 1902.

Max Kahn.

MEINER MUTTER.



Inhalt.

Seite

I. Litteratur 2

II. Der Uebergangswiderstand verschiedener Kohlensorten 3

Untersuchungsmethode 3

Beschreibung der Versuche 6

Ergebnisse der Untersuchungen 26

III. Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von der Stromrichtung . 32

IV. Verhalten des Uebergangswiderstands bei sehr rasch variierender Stromdichte. Der Wechselstromwiderstand 36

V. Anwendungen der Versuchsergebnisse 47

1. Berechnung des Spannungsabfalls unter den Bürsten . . 47

2. Uebergangswiderstand und Kommutation 49

VI. Ursachen der Widerstandsänderung 53



Die vorliegende Arbeit hat den Zweck, einige Anhaltspunkte zu geben über das Verhalten des Uebergangswiderstands zwischen Kohlenbürsten und Stromabgebern. Es sollen die Bedingungen, die seine Grösse beeinflussen, und die Art seiner Abhängigkeit von ihnen näher untersucht werden.

Unter Uebergangswiderstand versteht man das Verhältnis des Spannungsabfalls an der Kontaktstelle zur übertragenen Stromstärke. Der spezifische Uebergangswiderstand ist der Widerstand eines Quadratcentimeters der Uebergangsstelle. Im folgenden soll nur von letzterem die Rede sein; der Einfachheit des Ausdrucks halber sei daher dieser als Uebergangswiderstand oder auch manchmal kurz als Widerstand bezeichnet.

Der Uebergangswiderstand wird von einer grossen Anzahl von Faktoren bestimmt, und seine Grösse variiert innerhalb sehr weiter Grenzen. Vor allem haben wir hier die merkwürdige Erscheinung, dass die Stromdichte an der Uebergangsstelle, d. h. die pro Quadratcentimeter Kontaktfläche übertragene Stromstärke, einen grossen Einfluss ausübt und der Widerstand in sehr starkem Masse von ihr abhängt. Ferner ist derselbe bedingt durch den Auflagedruck der Bürsten, durch die Konstruktion, das Gewicht und die Federung der Bürstenhalter, durch die Art des Stromabgebers (ob Ring oder Kollektor), sein Material, seine Oberflächenbeschaffenheit und Umfangsgeschwindigkeit, durch die Vibrationen der Maschine, das Unrundlaufen des Stromabgebers u. a. m. Endlich hat auch die Beschaffenheit des Materials der Bürste wesentlichen Einfluss, und es ergeben sich bei verschiedenen Kohlensorten Unterschiede, welche in der vorliegenden Arbeit hauptsächlich Gegenstand der Untersuchung sein sollen.

I. Litteratur.

Die ersten Berichte über eine Untersuchung des Uebergangswiderstandes finden wir in der Litteratur im Jahre 1895. E. V. Cox und H. W. Buck hatten im Laboratorium des Columbia College in New York Messungen angestellt und diese in „The Electrical Engineer“ Bd. XX S. 125 veröffentlicht (The relations between pressure, electrical resistance and friction in brush contact.). Der elektrische Teil dieser Untersuchungen hat jedoch nur den Wert, die Art der Abhängigkeit des Widerstands vom Druck gezeigt zu haben. Thatsächliche Zahlenwerte lassen sich aus den Angaben nicht entnehmen, da die Variation des Widerstandes mit der Stromdichte nicht berücksichtigt und die Stromdichte, bei der die Versuche vorgenommen sind, nicht genannt ist. Die gleichzeitig angestellten Reibungsuntersuchungen scheinen jedoch gute Resultate ergeben zu haben. Sie zeigen, dass der Reibungskoeffizient vom Auflagedruck unabhängig ist und mit wachsender Geschwindigkeit abnimmt.

In Deutschland hat zuerst Prof. E. Arnold Versuche auf dem betrachteten Gebiete veröffentlicht (Der Kontaktwiderstand von Kohlen- und Kupferbürsten und die Temperaturerhöhung eines Kollektors. E.-T. Z. 1899, S. 5). Hier werden erstmals die sämtlichen Faktoren, die den Uebergangswiderstand beeinflussen, angegeben und namentlich seine Abhängigkeit von der Stromdichte nachgewiesen, die hauptsächlich die Variation des Widerstands bedingt. Dieser sinkt nämlich bei steigender Stromdichte stetig in sehr starkem Masse ab. Von geringerem Einfluss sind Auflagedruck und Umfangsgeschwindigkeit. Mit wachsender Geschwindigkeit nimmt der Widerstand erst zu und dann wieder ab, was mit Schwingungen der Bürsten erklärt wird. Bei Kohlenbürsten verschwindet diese Abhängigkeit bei höheren Stromdichten mehr und mehr. Ferner ergibt sich, dass der Uebergangswiderstand bei poliertem und geöltem Kollektor erheblich grösser ist, als bei durch längeren Betrieb geschwärztem.

Der Vollständigkeit halber seien hier auch die Versuche von C. Pierron erwähnt, der kurz nach Prof. E. Arnold im „Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse, Janvier 1899“ drei Versuchsreihen veröffentlicht. Er betrachtet allein die Abhängigkeit des Uebergangswiderstandes von der Umfangsgeschwindigkeit und findet ähnliche Kurven wie Prof. Arnold. Der Uebergangswiderstand ergibt sich bei Kollektoren grösser als bei Schleifringen und auf durch zwei-

ständigen Betrieb erwärmten Ringen kleiner als kurz nach der Inbetriebsetzung.

Die an erster Stelle erwähnten Versuche im Laboratorium der Columbia-Universität wurden von den Herren R. B. Tiballs, S. Löwenberg und W. G. Burns im Jahre 1899 fortgesetzt (The electrical and mechanical resistance of dynamo brushes. The El. World and Eng. 16. Sept. 1899). Die Untersuchungen beschäftigen sich mit der Abhängigkeit des Uebergangswiderstands und der Reibung von Stromdichte und Auflagedruck und berücksichtigen namentlich auch den Einfluss des Oelens des Kollektors. Die Resultate sind in einer Reihe von Sätzen zusammengefasst.

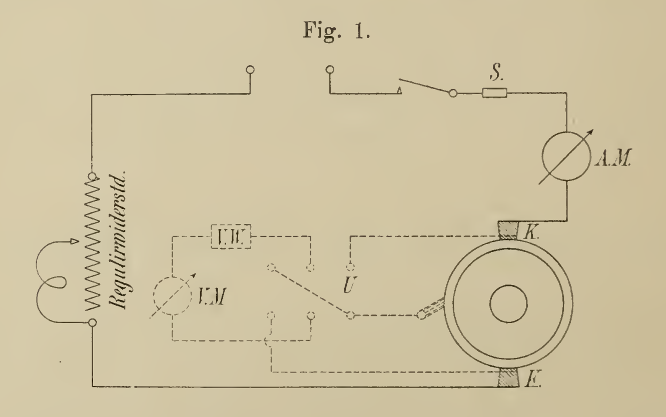
In letzter Zeit hat Ingenieur G. Dettmar ausgedehnte Versuche an Schleifringen und Kollektoren angestellt (Die günstigste Dimensionierung der Stromabnehmer bei Schleifringen und Kollektoren. E.-T. Z. 1900, S. 429). Er findet ähnliche Ergebnisse wie Professor Arnold; auf eine Abweichung in den Resultaten wird später genauer eingegangen werden. Die Versuchsergebnisse werden zu ausführlichen Untersuchungen über die günstigste Dimensionierung der Bürsten benutzt.

II. Der Uebergangswiderstand verschiedener Kohlensorten.

Untersuchungsmethode. Da es sich bei der vorliegenden Untersuchung um Messungen mit verschiedenen Kohlensorten und Vergleichung der gewonnenen Ergebnisse handelt, war es notwendig, die verschiedenen Versuche unter möglichst gleichen Bedingungen anzustellen, und für alle Sorten eine möglichst gleiche und genaue Untersuchungsmethode in Anwendung zu bringen. Die Messungen wurden daher an Schleifringen ausgeführt, da hier genauere Versuchsergebnisse gewonnen werden und Störungen eher vermieden werden können als bei Kollektoren. Der Ring wurde stets in möglichst blankem Zustande gehalten; bei Oxydation oder Schwärzung hätten sich graduelle Verschiedenheiten nicht leicht erkennen und berücksichtigen lassen. Aus demselben Grunde wurde vom Aufgeben von Oel abgesehen. Ein Hauptaugenmerk wurde auf eine gute Auflagefläche der Kohle gerichtet, und jede bei den Versuchen benutzte Sorte erst mit feiner Schmirgelleinwand möglichst genau eingeschliffen und dann durch längeres Einlaufen vollständig dem Ring angepasst. Der Vergleich erstreckte sich im übrigen hauptsächlich auf mittlere Verhältnisse und die in der Praxis üblichen Beanspruchungen.

Die Untersuchungsmethode war zum Teil durch die früheren Versuche von Arnold und Dettmar gegeben, jedoch sah ich mich veranlasst, eine Aenderung vorzunehmen. Bei diesen waren als Zu- und Ableitung zwei Bürsten auf einen Kollektor oder Ring aufgesetzt und der Widerstand der beiden hintereinandergeschalteten Kontakte durch Strom- und Spannungsmessung zwischen den beiden Kohlen festgestellt worden. Diese Methode bietet, abgesehen davon, dass es beinahe unmöglich ist, die beiden Kohlen gleichmässig, namentlich mit gleichem Auflagedruck aufzusetzen, Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Widerstandsänderung mit dem Auflagedruck. Man müsste immer den Druck beider Kohlen gleichmässig variieren, was ausserordentlich zeitraubend wäre und leicht zu Fehlern Veranlassung geben könnte. Ich zog es daher vor, immer nur den Widerstand eines Kontakts zu messen,

Fig. 1.



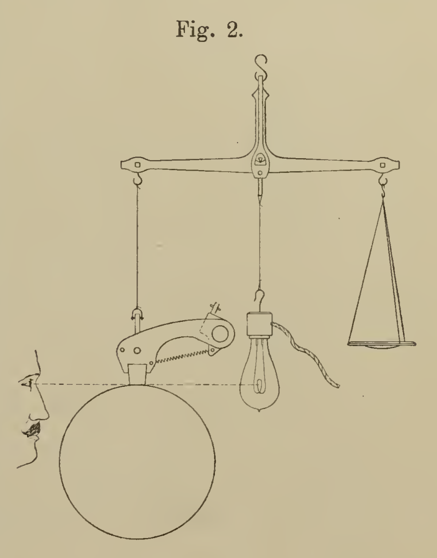
indem ich jeweils den Spannungsabfall zwischen Kohle und Ring feststellte. Der eine Voltmeterdraht wurde unten an der Kohle möglichst nahe der Kontaktfläche befestigt, der andere zu einer Hilfsbürste geführt (siehe Schaltungsschema Fig. 1).

So konnte die Spannungsdifferenz sowohl zwischen beiden Kohlen als auch zwischen dem Ring und jeder von ihnen gemessen werden. Volt- und Amperemeter wurden geeicht und die Eichung gelegentlich wiederholt.

Zur Bestimmung des durch Federdruck und Eigengewicht von Kohle und Halter erzeugten Auflagedrucks wurde, nachdem Versuche mit Federn ein unbefriedigendes Resultat ergeben hatten, die durch die Skizze Fig. 2 veranschaulichte Methode gewählt. Die Kohlen wurden jeweils an der obersten und untersten Stelle des Rings aufgesetzt, und der Auflagedruck mittels eines Wagebalkens, an dessen

Aufhängung eine Glühlampe befestigt war, ausgewogen. Es wurden auf die Wagschale jeweils so viel Gewichte aufgelegt, bis sich die Kohle vom Ring abhob. Unter dieser erschien dann ein feiner Lichtstreif der Glühlampe, welcher vom Ring widergespiegelt wurde. Auf diese Art konnte man den Auflagedruck auch bei rotierendem Ring bestimmen. Die so gefundene Pressung wäre jedoch noch zu gross, da beim Abheben nicht nur Federdruck und Eigengewicht, sondern auch die Reibung des Halters überwunden werden muss. Man kann daher nach dem Abheben eine Anzahl Gewichte von der Wagschale abnehmen, ohne dass sich die Bürste wieder aufsetzt. Nimmt man so viel weg, als die Reibung beträgt, so ist zwar der Federdruck gerade ausgewichtet; die Reibung wird jedoch auch jetzt noch ein Aufsitzen der Kohle verhindern, und erst, wenn man noch einmal einen der Reibung entsprechenden Betrag weggenommen hat, wird die Halterfeder die Kohle wieder aufdrücken und der durchschimmernde Lichtstreif verschwinden. Man findet also den richtigen Auflagedruck, wenn man das Mittel nimmt aus dem Gewicht, das gerade das Abheben bewirkt, und dem, bei welchem die Kohle wieder aufsitzt. Bei ruhendem Ring ergab sich die Reibung des Halters auf die Kohlenmittellinie bezogen zu 30 bis 40 g; der Auflagedruck betrug im Mittel 300 bis 400 g, so dass eine Berücksichtigung dieses Umstands bei Bestimmung des Auflagedrucks wohl angebracht erscheint. Bei Lauf war der Einfluss der Reibung erheblich kleiner, namentlich bei höheren Tourenzahlen. Die Druckmessungen wurden daher stets auch bei rotierendem Ring ausgeführt.

Fig. 2.

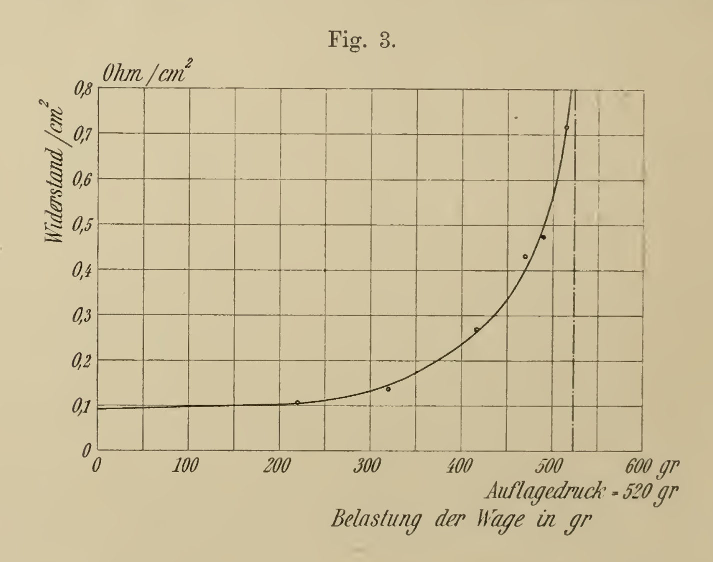


Zur Bestimmung des Auflagedrucks der an der untersten Stelle des Rings befindlichen Kohle wurde der Bürstenhalter um 180 Grad gedreht, so dass sie an den oberen Scheitelpunkt kam, und der Auflagedruck hier bestimmt. Der so gefundene Wert setzt sich zusammen aus der durch den Federdruck und der durch das Gewicht von Kohle und Halter verursachten Pressung. Der Anteil des Eigengewichts wurde nun bei gelöster Feder für sich ausgewogen und doppelt abgezogen,

da er ja an der untersten Ringstelle genau in entgegengesetztem Sinne wirkt wie oben.

Um die Genauigkeit der auf diese Art erhaltenen Resultate zu prüfen, wurde noch eine andere Methode zur Bestimmung des Auflagedrucks angewandt. Er wurde bei Stromdurchgang durch Belasten der Wagschale stetig verringert; gleichzeitig wurde der Uebergangswiderstand gemessen und als Funktion der aufgelegten Gewichte aufgetragen (Fig. 3). Eine Tangente an die Kurve senkrecht zur Abscissenachse schneidet auf dieser den Auflagedruck aus. Auch diese Messung lässt sich natürlich bei laufender Maschine ausführen. Die beiden Methoden ergaben auf 2 bis 3% übereinstimmende Resultate.

Fig. 3.



Es wurde bei späteren Messungen jedoch nur noch die erst beschriebene angewandt, da bei der zweiten bei niederen Auflagedrucken leicht Funken auftraten und der Ring anschmorte.

Dagegen wurde bei Bestimmung der Abhängigkeit des Widerstands vom Auflagedruck die Variation stets durch allmähliches Ausgewichten des Federdrucks vorgenommen, was eine rasche und exakte Messung ermöglichte. Um die Genauigkeit dieses Verfahrens zu prüfen, wurden Versuche bei verschiedenen Federspannungen vorgenommen; dieselben sind in Tafel 13 und 14 wiedergegeben.

Beschreibung der Versuche. Die Versuche wurden sämtlich im Laboratorium des elektrotechnischen Instituts der Technischen Hochschule in Karlsruhe ausgeführt. Die verwendeten Kohlen hatten

eine Kontaktfläche von ca. 3 qcm und zwar betrug die Länge in der Drehrichtung etwa 1,5 cm und die Breite ca. 2 cm. Sie wurden auf die Schleifringe eines Umformers der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft von 10 Kilowatt aufgesetzt, welcher mit Riemen angetrieben war. Der Ringdurchmesser betrug 156 mm, die Breite 25 mm. Als Bürstenhalter kamen die normalen A.E.G.-Halter der Maschine, wie sie in Fig. 2 skizziert sind, zur Verwendung.

Die Messungen wurden mit fünf in der Praxis gebräuchlichen Kohlensorten vorgenommen. Von Versuchen mit noch anderen Sorten wurde abgesehen, da das genaue Einschleifen und Einlaufenlassen der Kohlen für jede neue Kohle beträchtliche Zeit beansprucht und die untersuchten Sorten zur Charakterisierung der Unterschiede wohl ausreichen dürften. Die Sorten sind in der Reihenfolge, wie sie nacheinander untersucht wurden, numeriert. Diese Art der Numerierung erscheint deshalb wünschenswert, weil die bei den Versuchen mit den ersten Sorten gemachten Beobachtungen bei den späteren Untersuchungen verwendet wurden. Hauptsächlich unterschieden sich die verschiedenen Arten durch ihre Härte; diese war zum Teil aus Angaben der liefernden Firmen bekannt; hauptsächlich zeigte sich der Härtegrad aber auch deutlich beim Einschleifen.

Die I. Sorte fand ich bei Beginn der Versuche an der Maschine vor; es ist eine Kohle von mittlerer Härte; welches Fabrikat, konnte ich nicht in Erfahrung bringen.

Sorte II ist eine sehr harte Kohle aus der Fabrik von Dr. Albert Lessing, Nürnberg.

Sorte III ist eine sehr weiche, elektrographitische Bürste. Sie entstammt der Fabrik Le Carbone in Levallois-Perret bei Paris und wird von ihr als Marke X bezeichnet.

Die Sorten IV und V wurden von Siemens & Co., Charlottenburg zur Verfügung gestellt. Sorte IV ist die härteste Qualität (Marke Gr. R.) und Sorte V die weichste Qualität (Marke S), welche diese Fabrik zur Zeit der Versuche herstellte.

Die Versuche erstreckten sich hauptsächlich auf die Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von der Stromdichte unter den Bürsten, von der Geschwindigkeit, mit der die Ringoberfläche rotiert und von dem Auflagedruck, mit welchem die Kontakte gegen den Stromabgeber gepresst werden.

1. Die Variation der Stromdichte wurde durch Aenderung der Stromstärke mittels Vorschaltwiderständen bewerkstelligt. Bei diesen Versuchen zeigte sich eine Reihe von merkwürdigen Er-

scheinungen, welche bei allen Kohlensorten in gleicher Weise auftraten und im folgenden näher beschrieben werden sollen.

Bei Aenderung der Stromstärke, also auch der Stromdichte, ist der Widerstand, der sich sofort nach Einstellung einer neuen Stromdichte ergibt, von der vorhergehenden abhängig. Er ändert sich dann langsam und stetig, bis er bei einem jeder Stromdichte zugehörenden Wert konstant bleibt. Bei Uebergang von höheren Stromdichten zu niedereren ist der Anfangswert kleiner als der Endwert, beim Uebergang von niederen zu hohen grösser. Dieser Endwert ist jedoch für beide Fälle gleich, so dass man für jede Stromdichte nur einen Wert erhält. Man kann diese Erscheinung bei der angegebenen Messanordnung direkt an der Anzeige des Voltmeters verfolgen, da ja der Widerstand bei Konstanthalten der Stromdichte resp. Stromstärke dem Spannungsabfall proportional ist. Die Widerstandsänderung erfolgt stetig, anfangs rascher, bei Annäherung an den Endwert langsamer. Die Aenderungen sind um so stärker, je grösser der Sprung der Stromdichte zwischen zwei Messungen ist. Der ganze Vorgang dauerte meist 10 bis 15 Minuten je nach der Differenz der Stromdichten bei zwei aufeinanderfolgenden Messungen. Bei sämtlichen Versuchen wurde deshalb nach Einstellung einer neuen Stromdichte jeweils so lange gewartet, bis das Voltmeter einige Zeit konstant denselben Wert anzeigte, der Widerstand also den der neuen Stromdichte entsprechenden Wert angenommen hatte. In Tabelle 1, in der Versuche mit Kohlensorte I wiedergegeben sind, sind die Anfangswerte, die sich kurz nach Aenderung der Stromdichte ergaben und die Endwerte eingetragen. In die zugehörige Kurve Tafel 1 sind nur die endgültigen Werte aufgenommen und ebenso sind in allen folgenden Tafeln und Tabellen nur diese angegeben.

Auch direkt nach dem Anlassen der Maschine ist der Widerstand jeweils anfangs grösser und sinkt allmählich ab. Beim Abschmirgeln des Rings fällt er sehr stark ab, steigt jedoch dann sofort wieder langsam an; der Ring wird dabei durch die starke Reibung sehr heiss. Bei stromlosem Ring konnte keine Potentialdifferenz zwischen Ring und Kohle festgestellt werden.

Die Untersuchungen über die Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von der Stromdichte ergaben ferner, dass es für jede Kohlensorte eine Belastungsgrenze, d. h. eine maximale Stromdichte gibt, jenseits der die Kontakte nicht mehr regulär arbeiten. Es zeigten sich nämlich bei höheren Stromdichten Erscheinungen von Ueberlastung. Der Widerstand stieg plötzlich stark an, ohne dass an der Stromdichte

etwas geändert wurde, und das Voltmeter, welches ihn angab, zeigte überhaupt keinen konstanten Wert mehr, sondern schwankte unregelmässig hin und her. Es wurde dabei beobachtet, dass diese Belastungsgrenze von der Ringgeschwindigkeit beeinflusst wird und bei langsamem Lauf höher liegt als bei schnellerem, so dass man also bei Wahl von hohen Umfangsgeschwindigkeiten die Kohlen nicht so stark belasten darf, wie bei niedrigeren. Die Kohlen werden bei Stromdichten in der Nähe der Belastungsgrenze sehr heiss und ihre Kontaktfläche wird, wie es scheint, bei Ueberlastung verändert, was man daraus schliessen kann, dass der Uebergangswiderstand nach einer Ueberlastung öfters auch bei mittleren Stromdichten höher war, als er vor der Ueberlastung gemessen worden war.

Die numerischen Ergebnisse der Versuche über die Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von der Stromdichte sind in den Tabellen 1 bis 8 und den zugehörigen Tafeln 1 bis 8 wiedergegeben. Die Schlüsse, welche sich aus denselben ziehen lassen, sollen erst später angegeben und erläutert werden.

Uebergangswiderstand verschiedener Kohlensorten abhängig von der Stromdichte.

Tabelle 1 (Tafel 1).

Kohlensorte I. Kontaktfläche $F = 2,02 \times 1,51 = 3,05$ qcm. Auflagedruck/qcm $g = 136$ g. Ringgeschwindigkeit $v = 7,14$ m/Sek.

Stromdichte s Amp./qcm	Anfangsspannung E_a Volt	Endspannung E_e Volt	Anfangswert des spezifischen Widerstandes w_a Ohm	Endwert des spezifischen Widerstandes w_e Ohm
9,54	1,39	1,24	0,147	0,130
11,8	—[1]	1,18	—	0,100
8,55	1,10	1,16	0,129	0,136
6,00	1,04	1,17	0,174	0,195
4,78	—[1]	1,17	—	0,245
8,8	1,38	1,35	0,157	0,153
6,3	1,19	1,34	0,189	0,212
4,53	1,25	1,32	0,276	0,292
3,05	1,21	1,29	0,346	0,424
1,73	1,10	1,15	0,636	0,665
1,01	0,9	1,12	0,89	1,12
0,425	—[1]	0,75	—	1,77
3,05	1,35	1,34	0,443	0,44
6,65	—[1]	1,37	—	0,206

[1]) Nicht aufgenommen.

Tafel 1.

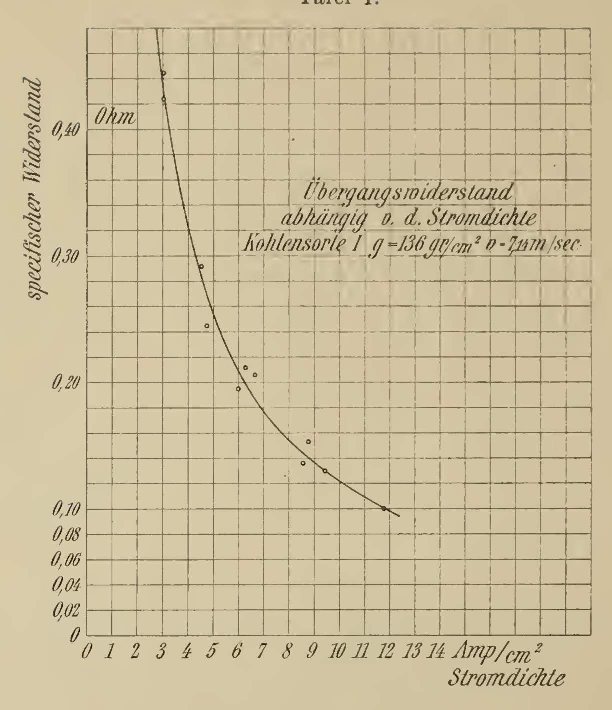


Tabelle 2 (Tafel 2).

Kohlensorte II. F = 3,00 qcm. v = 6,65 m/Sek.

A. g = ·95 g/qcm.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
0,433	0,62	1,43
1,87	1,20	0,64
3,23	1,45	0,447
4,96	1,54	0,312
6,76	1,68	0,249
8,06	1,57	0,195
9,16	1,53	0,168
6,76	1,35	0,205
5,46	1,52	0,278
3,9	1,46	0,376
1,87	0,85	0,45
0,43	0,79	1,83

B. g = 168 g/qcm.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
0,7	0,53	0,77
1,97	0,79	0,398
3,33	0,84	0,252
4,7	0,92	0,215
6,9	1,16	0,172
8,7	1,39	0,147
6,0	1,12	0,187
4,7	0,98	0,208
2,03	0,67	0,328
0,73	0,51	0,70
7,27	1,23	0,169

Tafel 2.

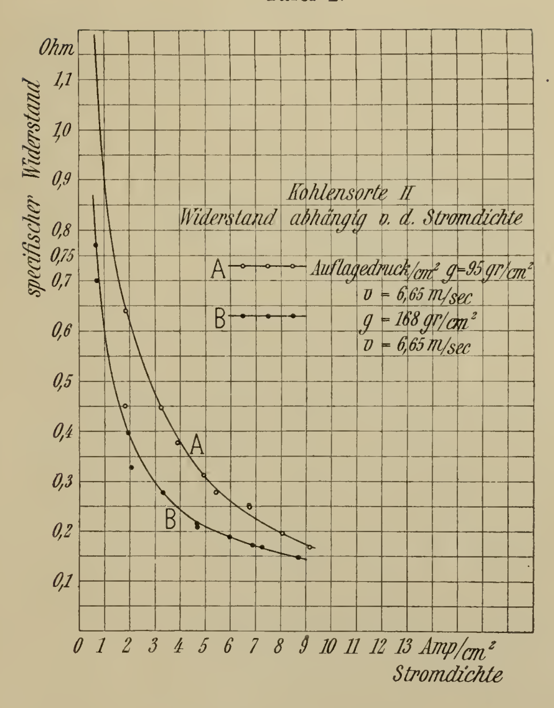


Tabelle 3 (Tafel 3).

Kohlensorte III. Kontaktfläche F = 3,00 qcm. Auflagedruck/qcm g = 181 g.
(Hoher Auflagedruck.)

I. v = 1,18 m/Sek.
II. v = 4,84 „
III. v = 7,58 m/Sek.
IV. v = 11,5 „

I.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
3,17	0,34	0,107
9,8	0,45	0,0458
14,4	0,48	0,0333
5,97	0,37	0,0617
3,48	0,31	0,089
1,44	0,27	0,187
7,5	0,40	0,0534
11,9	0,42	0,0353
2,27	0,25	0,110

II.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
5,43	0,445	0,082
8,77	0,44	0,0502
12,1	0,415	0,0343
3,43	0,41	0,119
2,1	0,38	0,181

III.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
7,23	0,44	0,061
1,43	0,40	0,279
3,43	0,49	0,143
6,78	0,48	0,071
10,1	0,50	0,0495
14,47	0,45	0,0311
8,43	0,43	0,051

IV.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
6 1	0,40	0,0655
9,43	0,51	0,0542
12,27	0,55	0,0448
3,43	0,37	0,108
1,43	0,34	0,237

Tabelle 4 (Tafel 4).

Kohlensorte III. (Mittlerer Auflagedruck.)

I. F = 2,72 qcm, g = 151 g/qcm, v = 3,3 m/Sek.
II. F = 2,72 „ g = 151 „ v = 6,35 „
III. F = 2,72 „ g = 151 „ v = 8,17 „
IV. F = 2,72 „ g = 151 „ v = 9,5 „
V. F = 300 „ g = 143 „ v = 6,54 „

I.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
16,6	0,55	0,0331
12,6	0,52	0,0513
7,87	0,48	0,0613
3,38	0,46	0,136
1,47	0,38	0,258

III.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
16,6	0,535	0,0322
13,7	0,51	0,0372
10,4	0,46	0,0443
7,46	0,42	0,056
4,45	0,38	0,0855
1,47	0,34	0,0231
2,32	0,40	0,0173

V.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
0,933	0,43	0,466
1,97	0,47	0,242
3,67	0,50	0,138
5,03	0,51	0,101
6,4	0,52	0,082
7,78	0,53	0,0683
9,08	0,53	0,0583
11,6	0,54	0,047
14,1	0,54	0,039
12,5	0,60	0,0484
9,9	0,62	0,059
6,94	0,55	0,0785
4,56	0,54	0,115

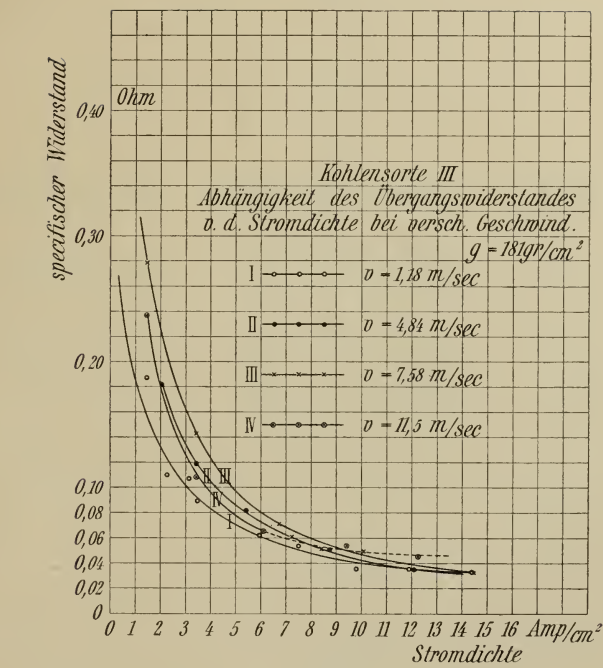
II.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
19,1	0,66	0,0345
15,2	0,62	0,0408
11,8	0,57	0,0484
7,35	0,56	0,0762
4,25	0,47	0,110
2,73	0,47	0,172
1,25	0,39	0,31
11,8	0,60	0,0508

IV.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
16,6	0,51	0,0307
13,0	0,49	0,0377
9,34	0,45	0,0482
5,9	0,41	0,0694
2,83	0,36	0,127
1,47	0,32	0,217

Tafel 3.



Tafel 4.

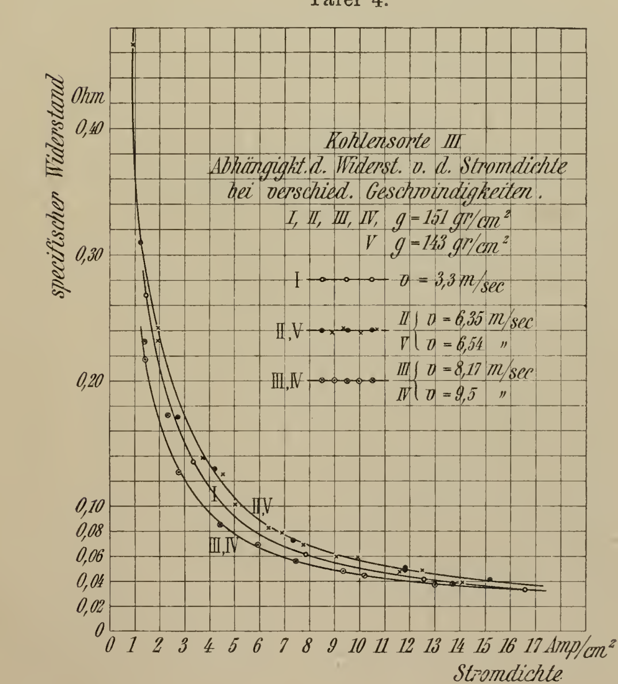


Tabelle 5 (Tafel 5).

Kohlensorte III. (Niederer Auflagedruck.) F = 2,72 qcm. g = 80 g/qcm.

I. v = 1,18 m/Sek.
II. v = 4,84 „
III. v = 7,58 „

I.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
10,8	0,51	0,0472
15,9	0,55	0,0346
6,6	0,41	0,0621
3,83	0,38	0,099
1,59	0,32	0,201
8,28	0,43	0,052
13,3	0,46	0,0346
2,5	0,33	0,132
3,5	0,33	0,094

II.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
6,00	0,43	0,0716
9,7	0,51	0,0526
13,35	0,54	0,0405
3,8	0,45	0,118
2,32	0,44	0,190

III.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
7,9	0,64	0,081
1,57	0,44	0,28
3,8	0,50	0,132
7,5	0,59	0,079
11,1	0,63	0,058
16,0	0,80	0,048
9,31	0,75	0,080

Tafel 5.

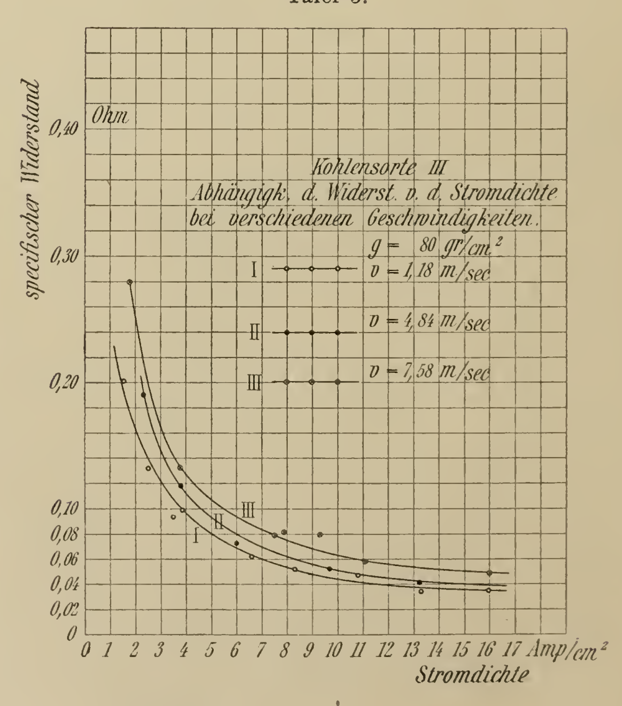


Tabelle 6 (Tafel 6).

Kohlensorte III. Kontaktfläche F = 3,16 qcm. Auflagedruck/qcm = 117 g/qcm.

I. v = 2,08 m/Sek.
II. v = 7,15 „
III. v = 9,8 „

I.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
4,59	1,04	0,227
6,43 [1]	1,22	0,174
3,26	0,98	0,301
1,68	0,85	0,505

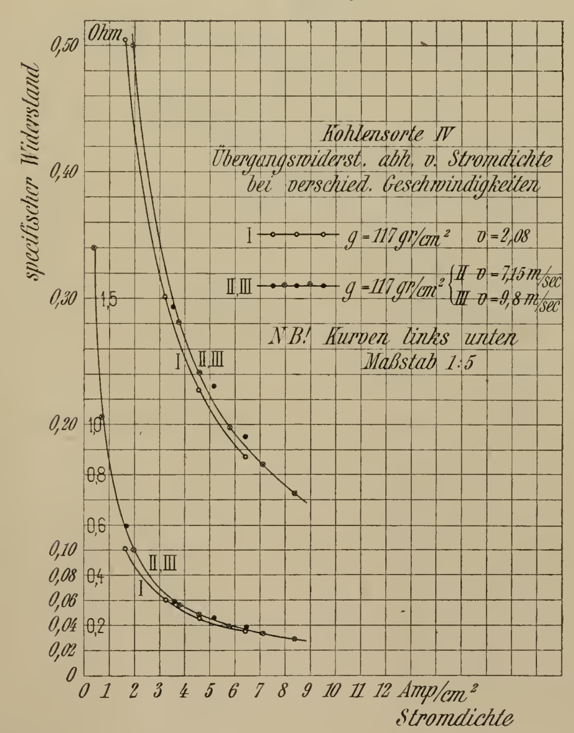
II.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
8,4 [1]	1,22	0,145
5,8	1,14	0,197
3,8	1,07	0,281
2,0	1,00	0,50
0,728	0,75	1,03
0,443	0,75	1,7
7,12	1,20	0,168
4,6	1,11	0,241

III.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
1,58	0,94	0,595
3,58	1,05	0,293
5,16	1,19	0,230
6,44 [1]	1,22	0,190
1,58	0,94	0,595

Tafel 6.



[1]) Bei höheren Stromdichten traten Funken auf.

Tafel 7.

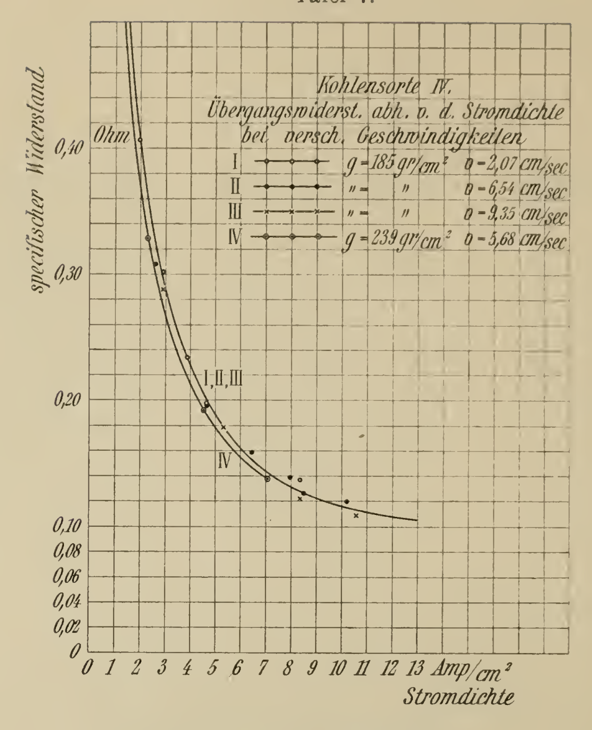


Tabelle 7 (Tafel 7).

Kohlensorte IV. (Hoher Auflagedruck.) Kontaktfläche F = 3,16 qcm.

I.	g = 185 g/qcm,	v = 2,07 m/Sek.
II.	g = 185 „	v = 6,54 „
III.	g = 185 „	v = 9,35 „
IV.	g = 239 „	v = 5,68 „

I.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
4,65	0,92	0,198
1,99	0,83	0,407
2,94	0,89	0,302
3,9	0,91	0,234
8,36	1,15	0,137

II.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
1,36	0,74	0,544
2,66	0,82	0,308
4,65	0,91	0,196
6,43	1,02	0,159
7,98	1,11	0,138
10,2	1,22	0,120
4,65	0,91	0,196
8,50	1,07	0,126

III.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
8,39	1,02	0,122
10,52	1,15	0,109
5,31	0,95	0,179
2,95	0,85	0,288

IV.

s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
7,06	0,98	0,138
4,53	0,87	0,192
2,31	0,76	0,329
1,36	0,71	0,52

Tabelle 8 (Tafel 8).

Kohlensorte V. Umfangsgeschwindigkeit v = 6,2 m/Sek.

A. Niederer Auflagedruck. g = 119 g/qcm. F = 3,00 qcm.
B. Hoher Auflagedruck. g = 160 „ F = 3,10 „

I. Stromrichtung: Metall nach Kohle,
II. Stromrichtung: Kohle nach Metall.

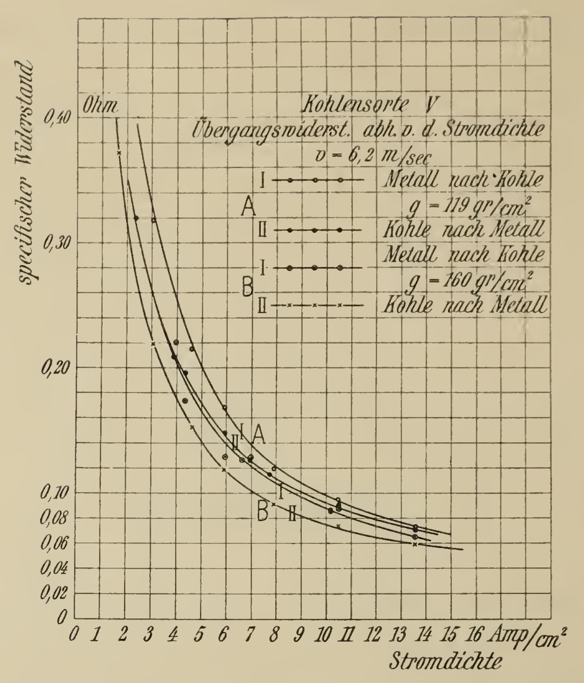
A. I.

J Amp.	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
24,5	7,9	0,94	0,119
18,4	5,95	1,00	0,168
14,45	4,66	1,00	0,215
9,35	3,05	0,97	0,318
5,25	1,69	0,97	0,575
2,5	0,806	0,85	1,05
0,9	0,291	0,75	2,58
0,81	0,261	0,75	2,87
0,46	0,148	0,72	4,86
0,13	0,042	0,72	17,1
0,061	0,0197	0,64	33,7
0,011	0,0035	0,19	54,2
0,0172	0,00565	0,25	44,2
0,030	0,0097	0,42	43,4
0,002	0,000642	0,03	47,0
0,0011	0,000395	0,02	55,6
32,5	10,5	0,99	0,0944
42,05	13,59	1,00	0,0736

A. II.

J Amp.	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
0,006	0,00194	0,105	53,0
0,0105	0,0034	0,15	44,2
0,068	0,0219	0,33	15,1
0,021	0,0068	0,20	29,4
0,124	0,040	0,35	8,75
0,45	0,145	0,45	3,1
1,1	0,356	0,50	1,4
3,24	1,05	0,65	0,62
7,3	2,37	0,76	0,32
13,4	4,34	0,85	0,196
18,5	5,98	0,87	0,148
24,0	7,75	0,89	0,115
31,6	10,2	0,87	0,085
21,6	6,98	0,88	0,126
12,3	3,98	0,83	0,209
32,5	10,5	0,95	0,0905
42,05	13,59	0,96	0,0706

Tafel 8.



B. I.

J Amp.	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
0,006	0,00194	0,07	36,0
0,0105	0,0034	0,15	44,2
0,068	0,0219	0,45	20,5
0,021	0,0068	0,27	39,7
0,124	0,040	0,57	14,3
0,45	0,145	0,55	3,79
1,1	0,356	0,58	1,63
3,24	1,05	0,65	0,62
7,3	2,37	0,76	0,321
13,4	4,34	0,75	0,173
18,5	5,98	0,77	0,129
24,0	7,75	0,89	0,115
31,6	10,2	0,88	0,086
21,6	6,98	0,90	0,129
12,3	3,98	0,88	0,221
20,6	6,66	0,84	0,126
32,5	10,5	0,92	0,088
42,05	13,59	0,88	0,0648

B. II.

J Amp.	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
24,5	7,9	0,72	0,091
18,4	5,95	0,70	0,118
14,45	4,66	0,71	0,152
9,35	3,05	0,67	0,219
5,25	1,69	0,63	0,372
2,5	0,806	0,52	0,645
0,9	0,291	0,48	1,65
0,81	0,261	0,5	1,91
0,46	0,148	0,38	2,57
0,13	0,042	0,275	6,55
0,061	0,0197	0,26	13,2
0,011	0,0035	0,055	15,7
0,0172	0,00565	0,10	17,7
0,030	0,0097	0,16	16,5
0,002	0,000642	0,01	15,5
0,0011	0,000359	0,01	27,8
32,5	10,5	0,67	0,0638
42,05	13,59	0,80	0,059

2. Eine weitere Reihe von Versuchen hatte den Zweck, zu bestimmen, wie der Uebergangswiderstand der einzelnen Sorten von der Umfangsgeschwindigkeit des Stromabnehmers beeinflusst wird. Eine Abhängigkeit von dieser könnte allenfalls von Bedeutung sein für die Wahl der Tourenzahl von Gleichstrommaschinen oder bei der Dimensionierung der Kollektoren, da durch diese bei gegebener Tourenzahl der Maschine die Umfangsgeschwindigkeit bedingt ist. Es kommt daher darauf an, für jede Ringgeschwindigkeit den Wert des Uebergangswiderstandes festzustellen, der einer dauernd konstanten Drehung mit dieser Geschwindigkeit entspricht. In Anbetracht davon und auf Grund der Beobachtungen über die allmählichen Aenderungen des Widerstands bei Variation der Stromdichte wurden die Messungen so vorgenommen, dass die Geschwindigkeit für jede einzelne Aufnahme längere Zeit konstant gehalten und der endgültige Wert des Widerstandes erst aufgenommen wurde, wenn die Verhältnisse sich der jeweiligen Geschwindigkeit angepasst hatten. Zufällige Aenderungen wurden dabei dadurch aus dem Resultat ausgeschaltet, dass jede Versuchsreihe doppelt mit steigender und mit fallender Geschwindigkeit aufgenommen wurde. Es zeigten sich ähnliche allmähliche Aenderungen wie bei den Messungen mit variabler Stromdichte, jedoch konnten keine vollständig gleichmässigen Resultate erzielt werden. Dass man aber die Erscheinung nicht vollständig ausser acht lassen darf, ergaben Versuche mit Kohlensorte II. Bei diesen wurde der Widerstand erst bei rascher Variation der Geschwindigkeit und dann unter sonst gleichen Verhältnissen in einer Daueruntersuchung bestimmt. Bei rascher Variation blieb der Widerstand stets annähernd konstant, dagegen ergaben die Dauerversuche allmähliche, regelmässig wiederkehrende Aenderungen. Einer dieser Versuche ist in Tabelle 10 resp. Tafel 10 wiedergegeben. Tabelle 9 enthält die Dauerversuche für Kohlensorte I. Die Dauerversuche mit Sorte III und IV ergaben keine regelmässigen Kurven. Es wurden daher bei diesen Sorten die Messungen über die Abhängigkeit des Widerstands von der Stromdichte bei verschiedenen Geschwindigkeiten vorgenommen und mit den hierbei erhaltenen Kurven (Tafeln 3 bis 7) die Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bestimmt.

Tabelle 9 (Tafel 9).

Kohlensorte I. F = 3,05 qcm. g = 136 g/qcm. s = 6,85 Amp./qcm.

v m/Sek.	E Volt	w Ohm	v m/Sek.	E Volt	w Ohm
9,35	0,92	0,134	3,12	1,24	0,181
7,94	1,08	0,158	1,9	1,22	0,179
8,60	1,08	0,158	0	0,95	0,138
9,25	0,99	0,145	1,77	1,24	0,181
8,45	1,08	0,158	3,53	1,28	0,187
7,40	1,11	0,163	4,69	1,23	0,180
6,64	1,19	0,174	7,11	1,12	0,164
4,77	1,24	0,181	9,35	1,09	0,159
3,85	1,24	0,181			

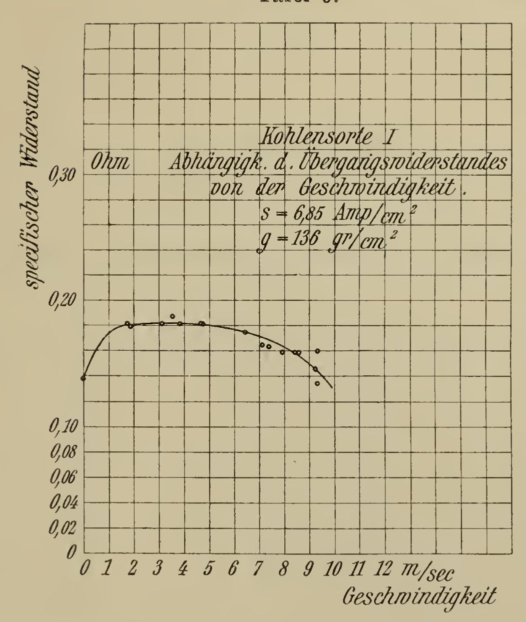
Tabelle 10 (Tafel 10).

Kohlensorte II. Kontaktfläche F = 3,00 qcm. Spezifischer Auflagedruck g = 95 g/qcm.

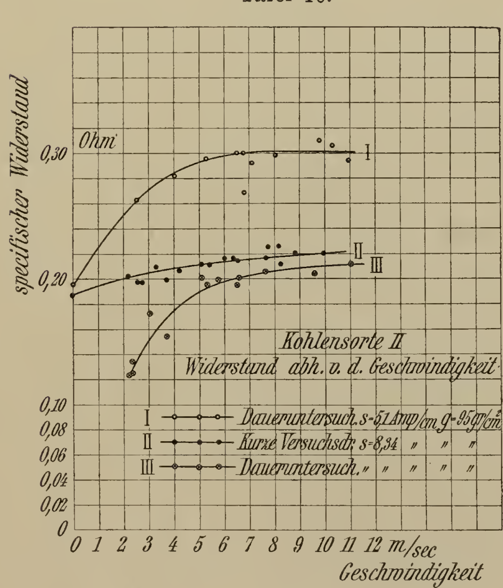
I. Stromdichte s = 5,1 Amp./qcm (Daueruntersuchung).
II. Stromdichte s = 8,43 „ (bei rascher Variation).
III. Stromdichte s = 8,43 „ (Daueruntersuchung).

I. v m/Sek.	I. E Volt	I. w Ohm	II. v m/Sek.	II. E Volt	II. w Ohm	III. v m/Sek.	III. E Volt	III. w Ohm
11,00	1,5	0,294	6,7	1,80	0,214	2,25	1,04	0,123
9,84	1,58	0,31	6,4	1,82	0,216	3,33	1,07	0,127
8,10	1,52	0,298	4,26	1,74	0,206	2,40	1,05	0,125
6,85	1,32	0,259	3,32	1,76	0,209	3,73	1,3	0,154
7,15	1,49	0,292	2,78	1,66	0,197	5,15	1,69	0,200
6,54	1,53	0,30	0	1,58	0,187	5,80	1,68	0,199
6,8	1,53	0,30	2,22	1,70	0,202	6,61	1,69	0,200
5,32	1,51	0,296	2,60	1,66	0,197	7,69	1,73	0,205
4,08	1,44	0,282	3,72	1,68	0,199	9,6	1,72	0,204
2,57	1,34	0,263	5,15	1,78	0,211	11,1	1,78	0,211
6,56	1,53	0,30	5,44	1,78	0,211	5,4	1,65	0,195
10,35	1,56	0,306	6,05	1,82	0,216	3,06	1,45	0,172
0	1,00	0,196	6,57	1,80	0,214	6,55	1,64	0,195
			7,7	1,82	0,216	2,35	1,15	0,134
			8,3	1,78	0,211			

Tafel 9.



Tafel 10.



3. Die Versuche über die Abhängigkeit des Uebergangswiderstands der verschiedenen Kohlensorten vom Auf-

lagedruck geben zu keinen besonderen Bemerkungen Anlass. Die numerischen Ergebnisse sind in den Tabellen 11 bis 14 und den zugehörigen Tafeln gegeben.

Tabelle 11 (Tafel 11).

Kohlensorte I. Kontaktfläche F = 3,05 qcm. Stromdichte s = 6,0 Amp./qcm.
Geschwindigkeit v = 6,35 m/Sek.

g g/qcm	E Volt	w Ohm	g g/qcm	E Volt	w Ohm
130	1,35	0,225	31	1,57	0,262
104	1,44	0,24	15	1,74	0,290
97	1,51	0,252	8,5	2,7	0,451
80	1,54	0,257	5,3	3,4	0,568
64	1,54	0,257	1,96	4,5	0,75
48	1,56	0,260			

Tafel 11.

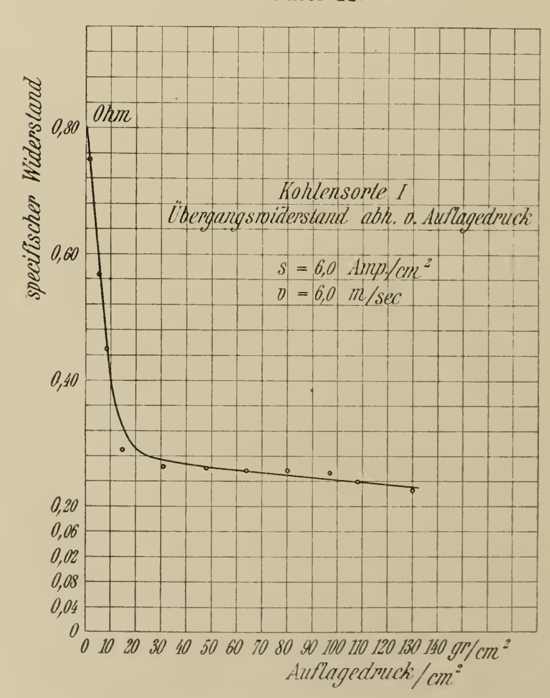


Tabelle 12 (Tafel 12).

Kohlensorte II.

I. F = 3,00 qcm. s = 6,73 Amp./qcm. v = 5,11 m/Sek.
II. F = 2,60 „ s = 7,82 „ v = 6,5 „

I.

g g/qcm	E Volt	w Ohm	g g/qcm	E Volt	w Ohm
233	0,88	0,131	60	1,35	0,201
193	0,93	0,138	93	1,28	0,191
160	1,00	0,149	160	1,06	0,158
127	1,11	0,165	233	0,88	0,131
93	1,28	0,191	93	1,36	0,203
60	1,41	0,210	60	1,50	0,224
27	1,78	0,264	43	1,59	0,238
60	1,32	0,197	37	1,63	0,243
43	1,48	0,221	30	1,83	0,273
37	1,58	0,235	93	1,32	0,197
43	1,46	0,227	233	0,88	0,131
37	1,56	0,233			

II.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
162	0,93	0,119
135	1,04	0,133
115	1,14	0,146
96	1,24	0,159
77	1,41	0,180
58	1,51	0,193
38	1,66	0,212
31	1,83	0,234
23	3,00	0,384

Tafel 12.

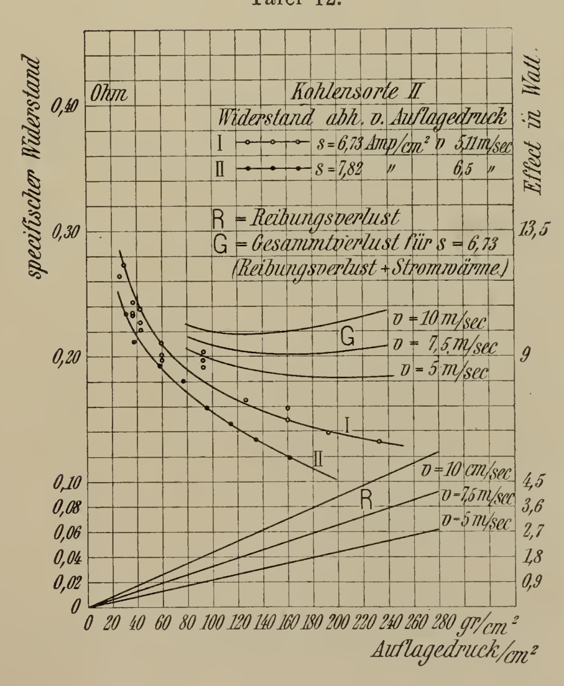


Tabelle 13 (Tafel 13).

Kohlensorte III. Kontaktfläche F = 3,00 qcm.

A. Ringgeschwindigkeit v = 0. Stromdichte s = 6,77 Amp./qcm.
B. v = 6,54 m/Sek. s = 6,77 Amp./qcm.

I. Auszubalancierender Auflagedruck[1]) g_0 = 309 g/qcm.
II. Auszubalancierender Auflagedruck g_0 = 187 „
III. Auszubalancierender Auflagedruck g_0 = 44 „

A.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
309	0,19	0,028
237	0,25	0,0368
175	0,34	0,0502
106	0,445	0,0655
73	0,54	0,0796
41	0,77	0,113
24,5	0,99	0,146
18	0,90	0,133
12	·0,97	0,143
8	1,02	0,150

B. I.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
308	0,47	0,071
269	0,47	0,071
237	0,44	0,0665
204	0,43	0,065
139	0,45	0,068
73	0,51	0,077
41	0,60	0,091
34	0,61	0,0925
24,5	0,68	0,103

B. II.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
187	0,40	0,0605
148	0,44	0,0665
116	0,49	0,074
83	0,54	0,0816
51	0,62	0,094
33	0,69	0,105
18	0,80	0,121
4,9	1,5	0,227
51	0,61	0,925

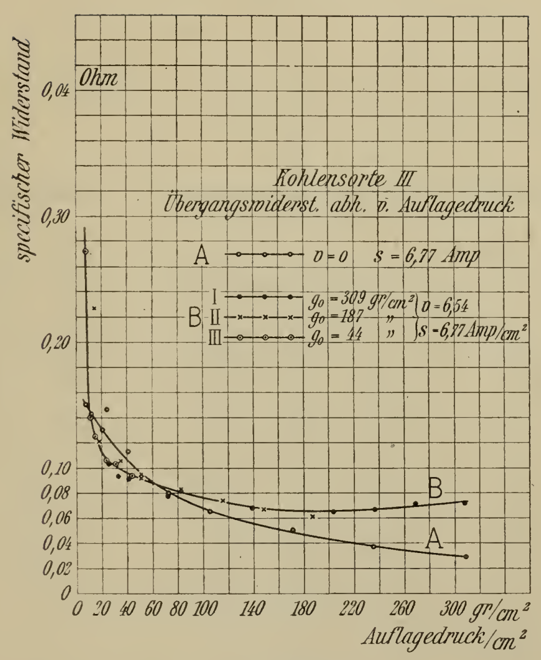
B. III.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
44	0,62	0,094
31	0,69	0,103
24	0,70	0,106
18	0,80	0,121
15	0,83	0,125
11	0,93	0,140
8	1,80	0,272

---

[1]) g_0 ist der durch Federdruck und Eigengewicht hervorgebrachte Auflagedruck, welcher bei der Messung durch Gegengewichte ausbalanciert wird.

Tafel 13.



Tafel 14.

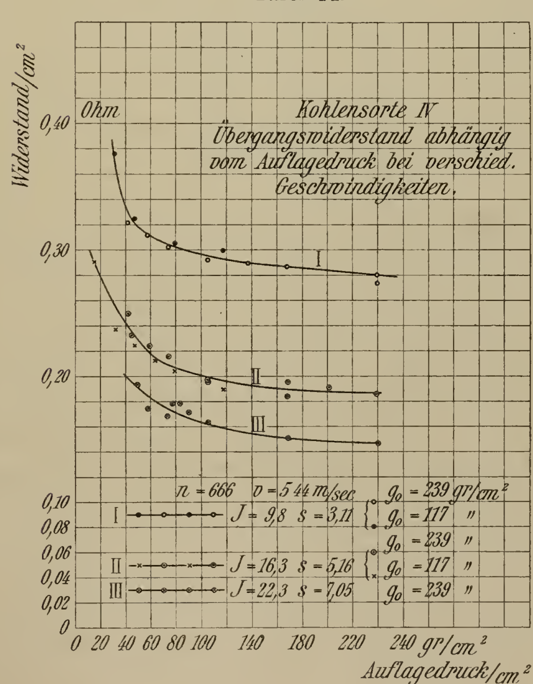


Tabelle 14 (Tafel 14).

Kohlensorte IV. Kontaktfläche F = 3,16 qcm. Geschwindigkeit v = 5,44 m/Sek.

I. Stromdichte s = 3,11. A. g_0 = 239 g/qcm. B. g_0 = 117 g/qcm.
II. Stromdichte s = 5,16. A. g_0 = 239 „ B. g_0 = 117 „
III. Stromdichte s = 7,05. g_0 = 239 „

I.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
	A.	
239	0,87	0,279
168	0,89	0,286
137	0,90	0,289
105	0,91	0,292
74	0,94	0,302
58	0,97	0,311
42	1,00	0,321
239	0,85	0,273
	B.	
117	0,93	0,299
79	0,95	0,305
47,5	1,01	0,325
32	1,14	0,376

II.

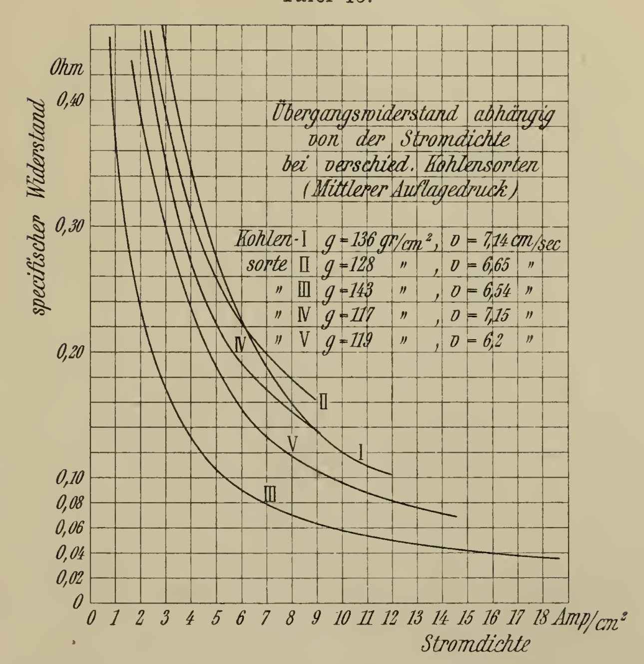
g g/qcm	E Volt	w Ohm
	A.	
239	0,95	0,184
200	0,98	0,190
168	1,00	0,194
105	1,00	0,194
168	0,95	0,184
105	1,01	0,196
74	1,11	0,215
42	1,28	0,249
58	1,15	0,223
45	1,20	0,233
	B.	
117	0,97	0,188
79	1,05	0,203
63	1,09	0,211
47,5	1,15	0,223
32	1,22	0,236
16	1,5	0,290

III.

g g/qcm	E Volt	w Ohm
239	1,02	0,145
168	1,05	0,149
105	1,14	0,162
90	1,20	0,170
83	1,25	0,177
77	1,25	0,177
74	1,18	0,167
58	1,22	0,173
45	1,35	0,192

Ergebnisse der Untersuchungen. Von den betrachteten Variabeln übt die Stromdichte weitaus den grössten Einfluss auf den Uebergangswiderstand aus und die Veränderungen, welche er in Abhängigkeit von Umfangsgeschwindigkeit und Auflagedruck zeigt, treten hiergegen vollständig zurück. Wir wollen daher die einzelnen Sorten vor allem mit Rücksicht hierauf gegenüberstellen und vergleichen. Auf Tafel 15 und 16 sind die für mittlere Ringgeschwindigkeiten erhaltenen Resultate zusammengestellt. Genau gleicher Auflagedruck für alle Sorten konnte nicht erreicht werden, da die Feder der Bürstenhalter feinere Einstellungen nicht zuliess. Die Unterschiede sind jedoch nicht gross, und da, wie erwähnt, die Variationen des Widerstands mit dem Auflagedruck zurücktreten gegen die betrachtete Abhängigkeit von der Stromdichte, kann man die dargestellten Kurven

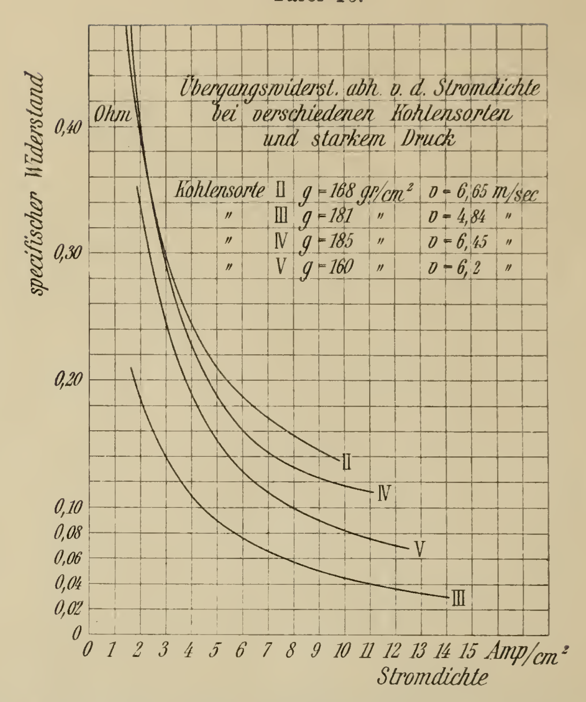
Tafel 15.



direkt miteinander vergleichen. Es ergibt sich, dass die Sorte III bei weitem den geringsten Uebergangswiderstand hat; dann folgen die Sorten V, IV, II. Sorte I lässt sich in die Reihenfolge nicht einordnen, da ihre Kurve die Kurven II und IV schneidet. Nun war von den zur Untersuchung herangezogenen Kohlen Sorte III am weichsten und Sorte IV am härtesten; von den Sorten IV und V, welche ein und derselben Fabrik entstammen, ist IV die härteste und V die weichste Kohle, welche die liefernde Firma fabriziert. Vergleicht man die Grösse des Uebergangswiderstandes der einzelnen Sorten mit diesen Angaben, so sieht man, dass diese von dem Härtegrad der Kohlen abhängig ist und dass der Uebergangswiderstand um so grösser ist, je härter die Kohle. Der Uebergangswiderstand von Sorte III (Le Carbone, X) ist bedeutend geringer als der der anderen Kohlensorten. Die liefernde Firma weist darauf hin und warnt davor, diese Sorte ohne Rücksicht darauf anderen Sorten zu substituieren. Es habe sich in der Praxis herausgestellt, dass dann leicht Funkenbildung eintreten könne. Sie empfiehlt daher, die Kontaktfläche gegenüber andern Sorten auf die Hälfte zu reduzieren.

Entsprechend der Verschiedenheit der Uebergangswiderstände ist auch die Belastungsfähigkeit der einzelnen Sorten je nach der Härte

Tafel 16.



eine andere. Für die sehr harte Sorte II ist die Grenze etwa bei 9 Amp./qcm: Sorte IV erträgt 9 bis 11 Amp./qcm, Sorte I ca. 12 Amp./qcm, Sorte V 14 bis 15 Amp./qcm und die weichste Sorte 15 bis 20 Amp./qcm. Ja die Firma Le Carbone berichtet, dass eine 600-Amp.-Dynamo in Levallois-Perret sogar mit 22,5 Amp./qcm tadellos arbeite.

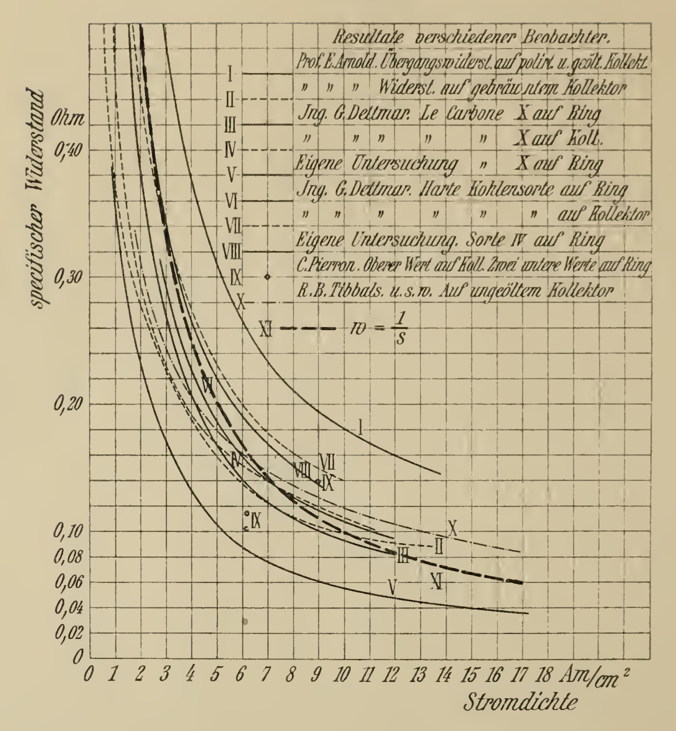
Im Anschluss an diese Vergleichung wurden auch noch die in der Litteratur veröffentlichten Messresultate für Kohlenbürsten auf Tafel 17 zusammengestellt und ausserdem die Kurven für Sorte IV (als mittlere Kurve für die gewöhnlichen Sorten) und III aus Tafel 15 übertragen. Die Unterschiede sind teilweise ziemlich bedeutend, erklären sich aber aus der Verschiedenheit der Versuchsbedingungen und Kohlensorten. Der Uebergangswiderstand ist bei der gleichen Kohle für Kollektoren grösser als für Ringe und wird ausserdem durch die Oberflächenbeschaffenheit der Stromabgeber bedingt; für blank polierten und geölten Kollektor ist er am grössten (Kurve I Tafel 17). Die niedrigsten Werte ergaben die von mir selbst an Ringen angestellten Versuche mit der Kohlensorte III, Le Carbone X (Kurve V). Ing. Dettmar findet für dieselbe Kohlensorte ebenfalls an Ringen höhere

Tabelle 15 (zu Tafel 17).

Versuchsergebnisse verschiedener Beobachter.

Nr.	Beobachter	Veröffentlicht in	g g/qcm	v m/Sek.	Bemerkungen:
I.	Prof. E. Arnold	E.-T. Z. 1899, S. 5	120	6,1	Widerstand bei poliertem und geöltem Kollektor
II.	Prof. E. Arnold	E.-T. Z. 1899, S. 5	120	6,1	Widerstand bei gebräuntem Kollektor
III.	Ing. G. Dettmar	E.-T. Z. 1900, S. 430	139	7,00	Le Carbone X auf Ring
IV.	Ing. G. Dettmar	E.-T. Z. 1900, S. 430	149	> 2	Le Carbone X auf Kollektor
V.	Eigene Untersuchung	Tafel 4	143	6,54	Le Carbone X auf Ring
VI.	Ing. G. Dettmar	E.-T. Z. 1900, S. 430	234	6,5	Harte Kohlensorte auf Ring
VII.	Ing. G. Dettmar	E.-T. Z. 1900, S. 430	149	> 2	Harte Kohlensorte auf Kollektor
VIII.	Eigene Untersuchung	Tafel 6	117	7,15	Kohlensorte IV auf Ring
IX.	C. Pierron	Bull. de la Soc. ind. de Mulhouse. Janvier 1899.	Wie in der Praxis gebräuchlich	7,8 8,8 7,95	Auf Ring nach 1/4stündigem Lauf: s = 6,16 Amp./qcm, w = 0,114 Ohm Auf Ring nach 2stündigem Lauf: s = 6,16 Amp./qcm, w = 0,102 Ohm Auf Kollektor: s = 8,99 Amp./qcm, w = 0,139 Ohm
X.	R. B. Tibbals, W. Löwenberg, W. G. Burns	El. World Bd. 34, S. 418, Fig. 6	186	—	Bei ungeöltem Kollektor

Tafel 17.



Werte (Kurve III). Diese Kurve (III) wird jedoch bis zu 5 Amp./qcm Stromdichte von Kurve IV, den von Dettmar selbst am Kollektor aufgenommenen Werten stark unterschnitten und es ist doch wohl kaum anzunehmen, dass sich bei derselben Kohle für Kollektoren niederere Werte ergeben als für Schleifringe. Auch aus den Berichten der Firma Le Carbone geht, wie erwähnt, hervor, dass der Uebergangswiderstand für diese Sorte bedeutend kleiner ist als für die sonst gebräuchlichen. Für diese gewöhnlichen Sorten kann man, falls keine genaueren Anhaltspunkte vorhanden sind, vielleicht die Werte, welche sich für Sorte IV ergeben haben, als Mittelwerte annehmen, die auch für Kollektoren gelten (siehe Tafel 15, 16, Tafel 17 Kurve VIII).

Während die Prüfung der Art der Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von der Stromdichte für alle Kohlensorten ein übereinstimmendes Resultat ergab, das, wie aus Tafel 17 hervorgeht, mit allen Angaben in der Litteratur vollständig übereinstimmt, waren die Ergebnisse der Messungen, welche die Abhängigkeit von der Ringgeschwindigkeit feststellen sollten, nicht in gleichem Masse exakt und befriedigend. Auch die in der Litteratur veröffentlichten Unter-

suchungen über diesen Gegenstand zeigen, dass man hier je nach den Verhältnissen, unter denen die Messungen vorgenommen werden, zu verschiedenen Resultaten kommen kann. Bei den Versuchen von Prof. E. Arnold und C. Pierron waren Aenderungen des Widerstands konstatiert worden. Der Widerstand stieg bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit an und fiel dann bei höheren Geschwindigkeiten wieder ab. Prof. Arnold führte diese Variationen auf Schwingungen der Bürsten zurück und nahm an, dass für das Maximum des Widerstands das Verhältnis zwischen der Eigenschwingungszahl der Bürsten und der Zahl der von den Lamellen ausgeübten Stösse ein besonders ungünstiges sei. Ing. G. Dettmar dagegen hat an Maschinen, deren Kollektor genau rund lief, so dass Bürstenschwingungen nicht auftraten, festgestellt, dass der Widerstand für Geschwindigkeiten von über 2 m/Sek. von der Geschwindigkeit unabhängig ist. Er erhielt dieses Resultat durch Messungen bei Auslauf der Maschine, also rascher Variation der Geschwindigkeit. Allmähliche Aenderungen, welche z. B. durch Einflüsse der Reibungswärme oder der Abkühlung verursacht werden könnten, konnten also nicht in Erscheinung treten. Die auf Seite 19 beschriebenen diesbezüglichen Versuche scheinen jedoch darauf hinzuweisen, dass derartige Wirkungen in der That eintreten können.

Jedoch zeigten sie sich bei den verschiedenen Kohlensorten auf verschiedene Weise. Bei Sorte I blieb der Widerstand von 1 bis 7 m/Sek. nahezu konstant und fiel dann etwas ab (Tafel 9). Bei Sorte II stieg er mit wachsender Geschwindigkeit an (Tafel 10). Für Sorte III ergaben die Versuche (Tafeln 3 bis 5), dass der Widerstand bis zu einer Umfangsgeschwindigkeit von etwa 7 m ansteigt, um dann wieder etwas abzunehmen. Die Variationen sind um so kleiner, je grösser die Stromdichte ist. Bei Sorte IV war der Widerstand für verschiedene Geschwindigkeiten konstant.

Es ergibt sich aus allem diesem, dass, wenn der Kollektor genau rund läuft, so dass die Bürsten nicht in Schwingungen kommen, der Uebergangswiderstand von rasch erfolgenden Geschwindigkeitsänderungen unabhängig ist. Er kann jedoch auch dann für verschiedene Geschwindigkeiten, welche dauernd konstant gehalten werden, etwas verschieden sein. Allgemeine Regeln lassen sich aber für diese Variation nicht aufstellen, auch ist dieselbe nicht sehr gross. Ist der Kollektor nicht genau rund oder schlägt die Maschine, so dass Schwingungen der Bürsten auftreten, so variiert der Widerstand und hat für eine bestimmte Geschwindigkeit einen Maximalwert. Ueber

die Grösse dieser Aenderungen und die kritische Geschwindigkeit lassen sich natürlich keine bestimmten Angaben machen, sondern diese werden in jedem einzelnen Falle verschieden sein, je nach dem Schlagen des Kollektors, der Zahl der Lamellen, dem Gewicht und der Konstruktion der Bürstenhalter u. s. w.

Es kommen, wie man sieht, hier eine ganze Reihe von Faktoren in Betracht, so dass sich von vornherein schwer bestimmte Angaben werden machen lassen. Die Variationen, die sich ergeben, sind jedoch sämtlich namentlich für höhere Stromdichten im Vergleich zu den Aenderungen des Widerstands mit der Stromdichte nicht sehr gross, so dass man am besten thun wird, dieselben nicht zu berücksichtigen.

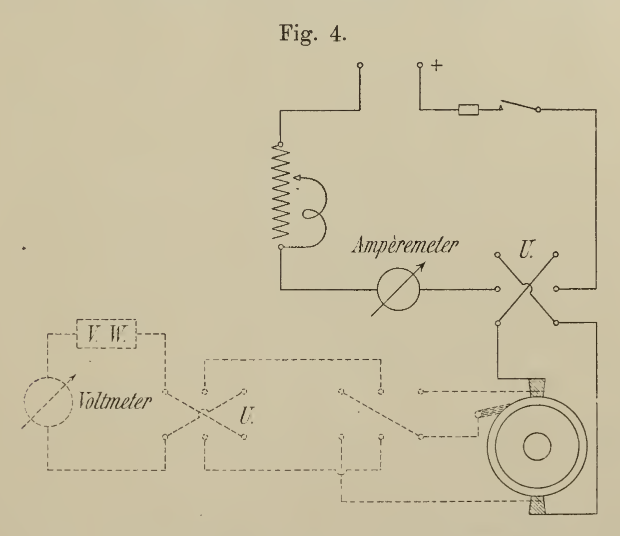
Die Abhängigkeit des Uebergangswiderstands der verschiedenen Kohlensorten vom Auflagedruck ist auf den Tafeln 11 bis 14 dargestellt. Umfangsgeschwindigkeit und Stromdichte haben auf die Art dieser Variation keinen Einfluss. In Uebereinstimmung mit den in der Litteratur veröffentlichten Versuchen zeigte sich bei der Sorte I. III und IV, dass die Aenderung des Widerstands bei den üblichen Drucken nur gering ist und der Widerstand erst bei kleinen Pressungen unter 80 g/qcm stärker ansteigt, die man schon der sicheren Auflage wegen vermeiden wird. Nur für die härteste Sorte (II) zeigte sich eine grössere Abhängigkeit. Man wird daher im allgemeinen den Auflagedruck so klein als möglich wählen, da hierdurch die Reibungsarbeit auf ihr Minimum reduziert wird, während die Verluste durch Stromwärme nur wenig steigen. Auch für Sorte II wird man sich dabei nicht sehr von den günstigsten Verhältnissen entfernen, wie die in Tafel 12 eingezeichneten Verlustkurven zeigen, so dass man obige Regel für Kohlenbürsten wohl allgemein aufstellen kann.

III. Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von der Stromrichtung.

Bei den in Kap. IV behandelten Versuchen mit Wechselstrom hatte es sich ergeben, dass der Uebergangswiderstand auch von der Richtung, in welcher der Strom die Kontaktstelle durchfliesst, beeinflusst wird. Es wurden daraufhin an Kohlensorte V, an der diese Erscheinung konstatiert worden war, Versuche mit Gleichstrom angestellt, und diese ergaben in der That eine Polarität. Wie bei allen vorhergehenden Versuchen wurden zwei Kohlenkontakte auf einen Ring aufgesetzt und der Strom durch den einen eingeleitet und durch den

andern abgeleitet (Schaltungsschema Fig. 4). Die Messungen wurden gleichzeitig an beiden Kohlen ausgeführt und durch öfteres Umkehren der Stromrichtung mit stets gleichem Ergebnis nachgeprüft, so dass es ausgeschlossen ist, dass das Resultat etwa durch zufällige, temporäre Aenderungen veranlasst worden ist. Es ergab sich, dass bei Stromübergang von Kohle nach Metall der Widerstand kleiner ist als bei der Stromrichtung Metall nach Kohle (Tabelle 8, Tafel 8). Der Einfluss trat an beiden Kohlen gleichmässig in Erscheinung, so dass nach dem Umkehren der Stromrichtung jeweils der Widerstand bei der einen Kohle kleiner und bei der andern grösser war als vorher. Auch hier zeigten sich allmähliche Aenderungen, ähnlich wie sie bei den

Fig. 4.



Versuchen mit variabler Stromdichte beschrieben sind. Der Widerstand zeigte sofort nach dem Umschalten einen niederen resp. höheren Wert als vorher, blieb jedoch nicht konstant, sondern die Abweichung von dem bei der andern Stromrichtung gemessenen Wert vergrösserte sich allmählich, so dass zum Beispiel bei Stromumkehr in die Stromrichtung Metall nach Kohle der Wert langsam weiter anstieg, bis sich nach 5 bis 15 Minuten ein konstanter Endwert einstellte.

Da dieses Verhalten bei einer ganzen Reihe von Versuchen stets und gleichmässig eintrat, wird es um so merkwürdiger erscheinen, dass sich bei ruhendem Ring zwar vollständig die gleichen Erscheinungen zeigten, jedoch jeweils bei entgegengesetzter Stromrichtung, so dass hier der Uebergangswiderstand für die Stromrichtung Kohle nach Metall grösser ist, als der für Stromübergang von Metall nach

Tabelle 16 (Tafel 18).

Uebergangswiderstand bei verschiedenen Stromrichtungen.

Kontaktfläche 4,12 qcm. Ring rotiert mit v = 9,5 m/Sek.

Strom-richtung	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm	Strom-richtung	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
M. n. K.[1]	1,21	0,39	0,322	M. n. K.	2,42	0,53	0,219
„	0,39	0,25	0,64	„	4,85	0,59	0,122
„	1,36	0,40	0,294	„	7,3	0,65	0,089
„	2,4	0,48	0,200	„	9,7	0,68	0,07
„	4,1	0,56	0,136	K. n. M.	9,7	0,51	0,0525
„	6,1	0,61	0,100	„	7,3	0,48	0,0656
„	7,65	0,66	0,086	M. n. K.	7,3	0,72	0,101
„	9,9	0,72	0,0728	K. n. M.	7,3	0,48	0,0656
„	12,05	0,78	0,065	„	4,85	0,45	0,093
„	14,0	0,82	0,0586	M. n. K.	4,85	0,65	0,134
„	10,2	0,80	0,079	K. n. M.	4,85	0,46	0,0946
„	6,5	0,71	0,109	„	3,4	0,43	0,129
„	3,34	0,55	0,165	M. n. K.	3,4	0,59	0,171
„	0,75	0,35	0,466	„	1,26	0,49	0,39
K. n. M.	0,75	0,26	0,346	K. n. M.	1,26	0,30	0,238
„	2,42	0,35	0,144	M. n. K.	1,23	0,45	0,366
„	5,00	0,41	0,082	„	0,78	0,38	0,49
„	7,3	0,45	0,062	„	0,48	0,30	0,625
„	9,7	0,46	0,0475	„	0,24	0,18	0,75
„	12,2	0,50	0,041	„	0,185	0,15	0,81
„	9,7	0,53	0,055	K. n. M.	0,185	0,11	0,595
„	7,3	0,50	0,069	„	0,097	0,12	1,24
„	4,85	0,44	0,091	M. n. K.	0,097	0,15	1,55
„	2,42	0,35	0,144				

Tabelle 17.

Uebergangswiderstand bei verschiedenen Stromrichtungen.

Ring steht still.

Kohle A. F = 4,12 qcm.

Strom-richtung	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
M. n. K.	0,97	0,425	0,438
K. n. M.	0,985	0,56	0,57
M. n. K.	0,985	0,43	0,437
„	3,14[2]	0,50	0,159
K. n. M.	3,14	0,56	0,179
M. n. K.	3,14	0,53	0,169
„	3,14	0,61	0,194
K. n. M.	3,14	0,55	0,175
M. n. K.	3,14[2]	0,54	0,172
K. n. M.	3,14	0,60	0,191
M. n. K.	3,14	0,57	0,182
K. n. M.	3,14	0,73	0,232
M. n. K.	3,14	0,60	0,191

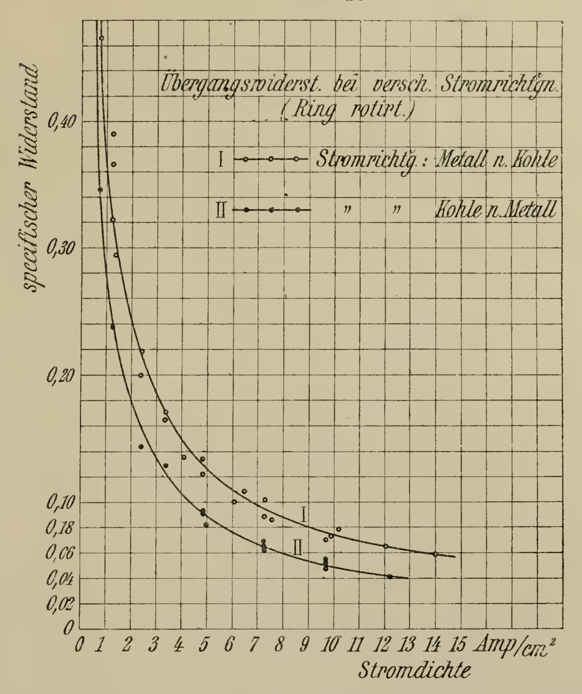
Kohle B. F = 4,00 qcm.

Strom-richtung	s Amp./qcm	E Volt	w Ohm
K. n. M.	1,00	0,68	0,68
M. n. K.	1,01	0,52	0,51
K. n. M.	1,01	0,58	0,57
M. n. K.	3,56[2]	0,82	0,231
K. n. M.	3,56	0,73	0,205
M. n. K.	3,56	1,03	0,290
K. n. M.	3,56	0,74	0,204
M. n. K.	3,56	1,04	0,292
K. n. M.	3,56[2]	0,85	0,239
M. n. K.	3,56	0,79	0,222
K. n. M.	3,56	1,15	0,324
M. n. K.	3,56	0,80	0,225
K. n. M.	3,56	1,16	0,326

[1]) M. n. K = Metall nach Kohle; K. n. M. = Kohle nach Metall.
[2]) Ring wurde vor der Messung etwas gedreht.



Tafel 18.



Kohle. Auch diese Erscheinung wurde auf alle mögliche Weise mit stets gleichem Erfolge nachgeprüft.

Der Ring war bei den Versuchen etwas gebräunt und lief auch nach dem Abschmirgeln stets wieder etwas an, ohne dass Strom hindurchgegangen wäre. Wahrscheinlich wurde diese Färbung durch das weiche, schmierende Material der bei den Versuchen verwandten Kohle veranlasst, indem sich Kohlenteilchen abrieben und auf den Ring und in seinen Poren festsetzten. Die Polarität wurde jedoch auch bei frisch geschmirgeltem, metallisch blankem Ring in gleicher Weise beobachtet.

Um zu untersuchen, ob die Polarität auch bei andern Kohlensorten vorhanden sei, wurden an einer andern Maschine mit einer andern Sorte von Kohlenkontakten noch eine Reihe von Versuchen angestellt, welche in der Hauptsache in Tabelle 16 resp. Tafel 18 wiedergegeben sind. Die Versuchsanordnung war dieselbe wie bei den ersten Versuchen. Der Strom wurde erst allmählich verstärkt und dann wieder geschwächt. Dann wurde die Stromrichtung umgekehrt und derselbe Kreisprozess durchlaufen und dann unter nochmaliger Stromumkehr die ersten Werte nachgeprüft. Zum Schluss wurden noch einige Werte so aufgenommen, dass für jede Stromdichte die Wider-

Tabelle 18.

Ringgeschwindigkeit v = 9 m/Sek.

Kohle A. F = 4,12 qcm.

Stromdichte Amp./qcm	Stromrichtung	Spannung vor dem Abwischen	Spannung sofort nach dem Abwischen
0,73	K. n. M.	0,28	0,36
0,73	M. n. K.	0,37	0,27
0,73	"	0,38	0,20
0,73	"	0,35	0,22
5,0	"	0,58	0,47

Kohle B. F = 4,00 qcm.

Stromdichte Amp./qcm	Stromrichtung	Spannung vor dem Abwischen	Spannung sofort nach dem Abwischen
0,75	M. n. K.	0,53	0,42
0,75	K. n. M.	0,44	0,75
0,75	"	0,42	0,55
0,75	"	0,37	0,57
5,15	"	0,70	1,07

stände für beide Stromrichtungen direkt nacheinander bestimmt wurden. Die hierbei erhaltenen Widerstandskurven zeigen deutlich, dass die temporären Widerstandsänderungen im Verhältnis zur Polarität zurücktreten und aus dem Endresultat herausfallen. Auch bei ruhendem Ring wurden mit dieser Sorte Messungen vorgenommen (Tabelle 17). Die Ergebnisse stimmen bei beiden Sorten vollständig überein.

Bei den Versuchen wurde noch eine andere eigentümliche Erscheinung bemerkt. Wenn man die bei der Drehung von der Kohle abgeriebenen Kohlenteilchen, welche die Ringoberfläche bedecken, mit einem Tuch abwischte, stieg der Widerstand bei der einen Kohle beträchtlich, während er bei der andern fiel; und zwar stieg jeweils der Widerstand bei der Stromrichtung Kohle nach Metall. Auch dieses Verhalten wurde durch öftere Stromumkehr nachgeprüft. Das Steigen des Widerstands war stärker als das Fallen und die Aenderungen waren so gross, dass die Polarität dadurch umgekehrt wurde, wie aus Tabelle 18 zu ersehen ist, so dass also der Widerstand in der Stromrichtung Kohle nach Metall der grössere wird und wir die gleiche Polarität haben wie bei ruhendem Ring. War der Ring nach dem Abputzen 15 bis 20 Minuten gelaufen, und hatte sich wieder eine neue Kohlenschicht gebildet, so nahm der Widerstand jeweils wieder denselben Wert an, den er bei Beginn des Versuchs vor dem Entfernen der Kohlenteilchen gehabt hatte. Diese Rückbildung ging allmählich, anfangs schneller, dann langsamer vor sich.

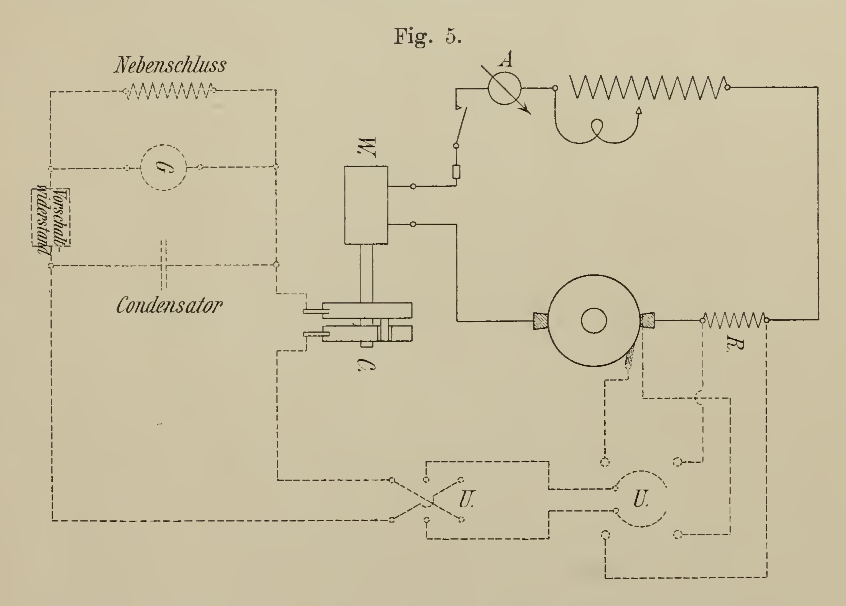
IV. Verhalten des Uebergangswiderstands bei sehr rasch variierender Stromdichte. Der Wechselstromwiderstand.

Der Uebergangswiderstand zwischen Kollektor und Bürsten ist, wie bekannt, von sehr grossem Einfluss bei der Kommutation. Bei

diesem Vorgange treten sehr rasche Aenderungen der Stromdichte unter den Bürsten auf, und es war von vornherein nicht abzusehen, ob der Widerstand auch von so schnell variierender Stromdichte beeinflusst würde. Es wurden daher Messungen über diesen Punkt angestellt, deren hauptsächlichste Resultate hier widergegeben werden sollen.

Die Untersuchungsmethode beruhte auf der raschen Variation der Stromstärke, die der Wechselstrom bietet. Es wurden zusammengehörige Momentanwerte der Stromstärke und des Spannungsabfalls gemessen und die Momentanwerte des Widerstands daraus berechnet. Da es bei diesen Messungen besonders darauf ankam,

Fig. 5.



möglichst gleichmässige Versuchsbedingungen herzustellen und alle Störungen hinwegzuschaffen, wurden auch diese Versuche an Schleifringen ausgeführt und nur anstatt der Gleichstromquelle eine Wechselstrommaschine (W) mit direkt gekuppeltem Kontaktgeber (C) in den Stromkreis eingeschaltet (Schaltungsschema Fig. 5). Die Momentanwerte der Stromstärke wurden an einem induktionsfreien Widerstande (R) gemessen, die Spannungsdrähte wieder unten an der Kohle möglichst nahe der Kontaktstelle und an einem Hilfskontakt angeschlossen, der ebenfalls der Uebergangsstelle möglichst nahe gerückt war. Ausgedehnte Versuche (es handelt sich hier um die Messung sehr kleiner Spannungsdifferenzen, und die Widerstandsunterschiede um den Ringumfang oder sonstige Schwankungen können störend wirken) ergaben,

dass sich ein gut gedämpftes ballistisches Galvanometer in der gezeichneten Schaltung am besten zu diesen Messungen eignet. Die Eichungen wurden mit Gleichstrom vorgenommen und über den ganzen Messbereich ausgedehnt und im Verlauf der Messungen öfter wiederholt.

Zu den Versuchen wurde die weiche Kohlensorte V verwendet. Die Messungen wurden mit Wechselströmen von 13,7 und 18,9 Amp. vorgenommen; da die mit beiden Stromstärken erhaltenen Resultate vollkommen übereinstimmten, wurde auf Aufnahmen mit andern Stromstärken verzichtet. Die aufgenommenen Strom- und Spannungskurven schneiden sich auf der Nulllinie, und die bei ansteigenden und bei fallenden Momentanwerten der Stromstärke aus Spannungsabfall und Stromstärke berechneten Widerstände stimmen vollständig überein; eine Phasenverschiebung ist demnach nicht vorhanden und die direkte Berechnung des Widerstands als Quotient von Spannung und Stromstärke auch hier zulässig. Die Ergebnisse der Messungen sind in den Tabellen 19 bis 22 und auf den Tafeln 19 bis 22 wiedergegeben.

Tabelle 19 (Tafel 19).

Uebergangswiderstand abhängig von rasch variierender Stromdichte bei einer effektiven Stromdichte $s_w = 4{,}42$ Amp./qcm.

Kohlensorte V. Kontaktfläche F = 1,42 × 2,18 = 3,10 qcm. Spezifischer Auflagedruck g = 119 g/qcm. Ringgeschwindigkeit v = 6,2 m/Sek. Periodenzahl c = 40.

I. Stromrichtung: Metall nach Kohle.
II. Stromrichtung: Kohle nach Metall.

I.

Momentanwert der Stromstärke i	Momentanwert der Stromdichte σ	Momentanwert des Spannungsabfalls e	Spezifischer Widerstand r
2,28	0,736	0,286	0,388
8,19	2,56	0,723	0,283
3,82	1,23	0,424	0,344
12,9	4,16	0,918	0,220
16,2	5,23	1,036	0,198
14,85	4,8	1,02	0,213
18,7	6,0	1,10	0,184
13,8	4,46	0,94	0,212
8,74	2,82	0,756	0,268
3,05	0,985	0,366	0,372
8,9	2,87	0,731	0,255

II.

Momentanwert der Stromstärke i	Momentanwert der Stromdichte σ	Momentanwert des Spannungsabfalls e	Spezifischer Widerstand r
15,4	4,97	0,91	0,183
16,55	5,35	1,035	0,194
14,45	4,65	0,89	0,191
11,25	3,64	0,724	0,199
10,5	3,39	0,736	0,217
7,7	2,49	0,594	0,238
4,98	1,61	0,515	0,320
8,6	2,78	0,683	0,245
9,8	3,16	0,785	0,249
10,32	3,33	0,73	0,219
3,02	0,976	0,306	0,313
1,72	0,555	0,195	0,351

Tafel 19.

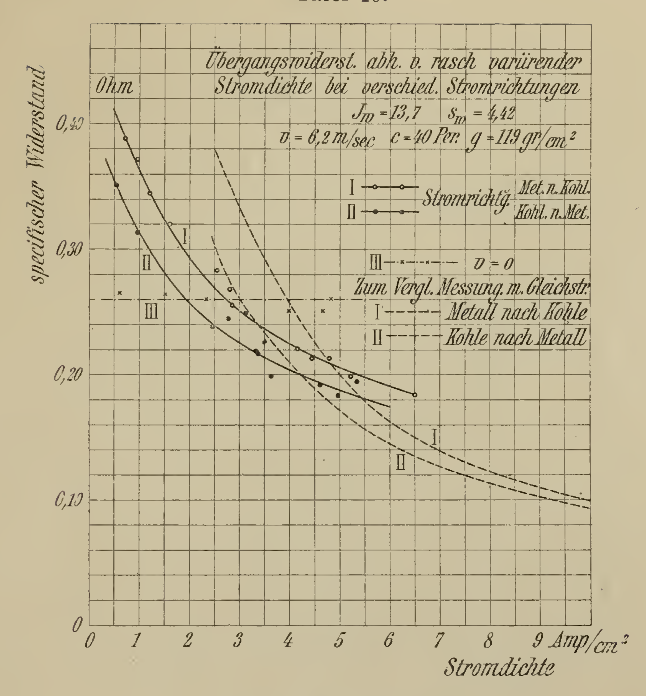


Tabelle 20 (Tafel 20).

Uebergangswiderstand abhängig von rasch variierender Stromdichte bei einer effektiven Stromdichte s_w = 6,15 Amp./qcm.

(Versuchsverhältnisse wie in Tabelle 19 angegeben.)

I. Stromrichtung: Metall nach Kohle.
II. Stromrichtung: Kohle nach Metall.

I.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
0,398	0,128	0,0396	0,308
11,6	3,75	0,734	0,195
5,48	1,77	0,452	0,256
25,9	8,35	1,175	0,140
30,4	9,8	1,28	0,131
27,0	8,7	1,19	0,136
21,0	6,76	1,02	0,151
13,9	4,5	0,799	0,178
13,65	4,41	0,806	0,183
0,973	0,314	0,1056	0,346

II.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
0,675	0,218	0,0528	0,243
11,3	3,65	0,70	0,192
25,8	8,31	1,025	0,123
30,2	9,74	1,22	0,125
26,9	8,66	1,19	0,137
20,25	6,54	0,99	0,150
14,0	4,52	0,762	0,169
9,66	3,12	0,594	0,190
5,78	1,87	0,41	0,22
2,76	0,89	0,231	0,259
1,22	0,394	0,1065	0,269

Tafel 20.

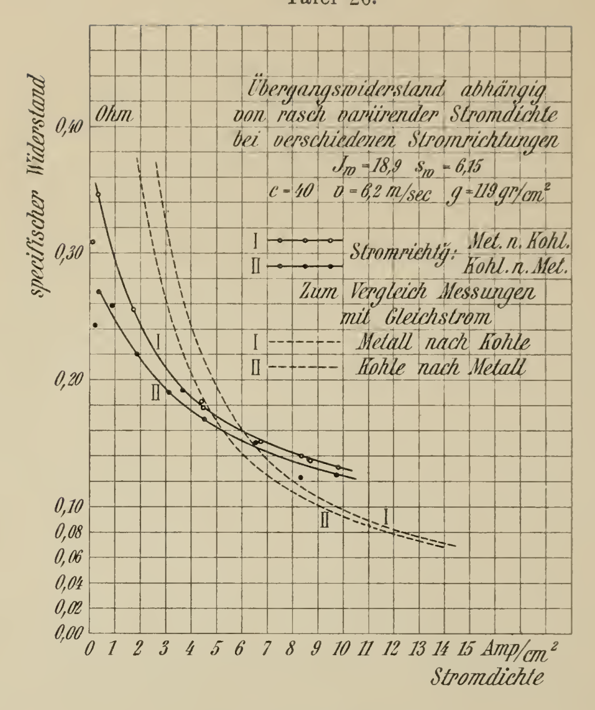


Tabelle 21 (Tafel 21).

Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von rasch variierender Stromdichte bei verschiedenen Variationsgeschwindigkeiten (Periodenzahlen).

Effektive Stromdichte s_w = 6,15 Amp. g = 119 g/qcm. v = 6,2 m/Sek.

A. Periodenzahl c = 40 (siehe Tabelle 20, II)
B. „ c = 118
C. „ c = 186

B.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
27,7	8,95	1,40	0,157
10,6	3,42	0,69	0,201
2,36	0,76	0,183	0,240
5,64	1,81	0,437	0,241
3,00	0,97	0,232	0,239
20,1	6,5	1,08	0,165

C.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
20,5	6,6	1,03	0,157
29,7	9,6	1,175	0,122
5,15	1,66	0,348	0,209
15,5	5,00	0,815	0,163
7,52	2,43	0,495	0,204
3,34	1,08	0,232	0,216

Tafel 21.

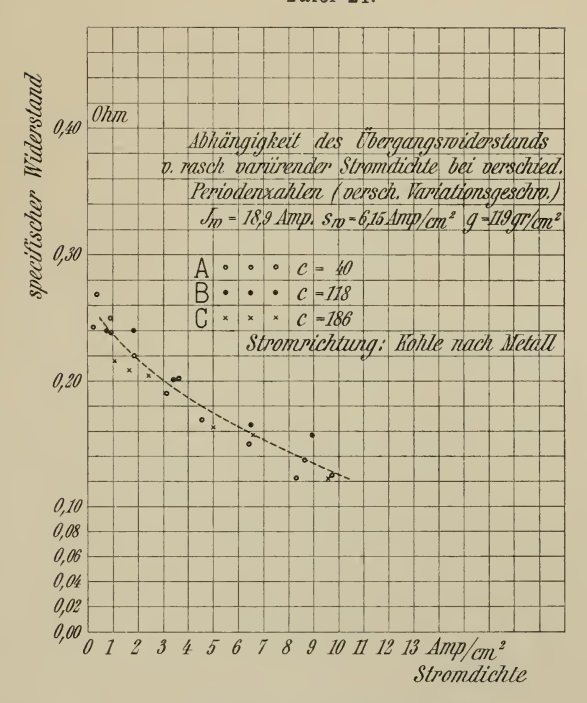


Tabelle 22 (Tafel 22).

Abhängigkeit des Uebergangswiderstands von rasch variierender Stromdichte bei verschiedenen Ringgeschwindigkeiten.

Stromrichtung: Kohle nach Ring. g = 119 g/qcm. c = 40 Perioden.

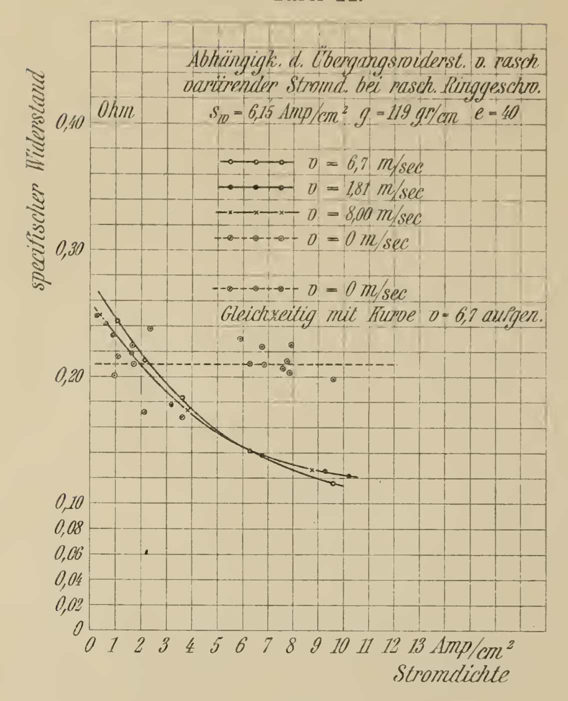
A. s_w = 6,15 Amp./qcm.
v = 1,81 m/Sek.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
21,0	6,79	0,945	0,139
28,8	9,3	1,175	0,126
31,3	10,1	1,23	0,122
9,9	3,2	0,568	0,178
5,1	1,64	0,359	0,219
0,775	0,25	0,062	0,248
2,76	0,89	0,207	0,233
1,87	0,605	0,162	0,242

B. s_w = 6,15 Amp./qcm.
v = 8,00 m/Sek.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
27,1	8,75	1,11	0,127
11,1	3,58	0,62	0,174
1,2	0,39	0,0965	0,249

Tafel 22.



C. s_w = 6,15 Amp./qcm.
v = 0 m/Sek.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
3,03	0,98	0,197	0,201
24,3	7,84	1,59	0,203
24,0	7,75	1,65	0,213
23,5	7,58	1,57	0,207
7,35	2,37	0,565	0,238
18,3	5,9	1,355	0,230
22,9	7,4	1,76	0,226
5,3	1,71	0,359	0,210
21,2	6,85	1,44	0,210
21,0	6,79	1,52	0,224
5,16	1,66	0,373	0,225

D [1]. s_w = 4,42 Amp./qcm.
v = 0 m/Sek.

i Amp.	σ Amp./qcm	e Volt	r Ohm
7,62	2,35	0,61	0,260
4,74	1,53	0,403	0,264
1,91	0,615	0,163	0,265
12,04	4,0	1,00	0,250
14,5	4,68	1,17	0,250
15,0	4,84	1,26	0,260

[1]) Zu Tafel 19.

E. s_w = 6,15 Amp./qcm. v = 6,7 resp. 0 m/Sek.

i	σ	v = 6,7		v = 0	
		e	r	e	r
Amp.	Amp./qcm	Volt	Ohm	Volt	Ohm
19,5	6,3	0,895	0,142	1,32	0,21
11,2	3,62	0,665	0,184	0,61	0,168
6,65	2,15	0,46	0,213	0,37	0,172
3,36	1,09	0,266	0,244	0,236	0,216
29,8	9,6	1,11	0,118	1,9	0,198

Die Versuche ergaben sämtlich, dass bei rotierendem Ring der Uebergangswiderstand auch bei sehr rascher Variation von der Stromdichte abhängig ist. Diese Abhängigkeit zeigte sich noch bei einer Periodenzahl von 186 Perioden, der höchsten, die für die Messung zur Verfügung stand. Die Stromdichte steigt dabei in $^1/_{744}$ Sekunde von Null zu ihrem Maximalwert an. Diese Variationsgeschwindigkeit ist etwa von derselben Grössenordnung, wie sie auch bei der Kommutation in Betracht kommt. Die Zeitdauer einer Periode ist dort gleich der Zeit, in der sich der Kollektor um eine Lamellenbreite dreht, für eine Lamellenbreite von 0,01 m und eine Umfangsgeschwindigkeit von 10 m/Sek. demnach gleich $^1/_{1000}$ Sekunde. Da bei Messungen mit 40, 118, 186 Perioden (Tabelle 21, Tafel 21) kein sehr merklicher Unterschied im Verhalten des Widerstands hervortrat, kann man annehmen, dass dieser von der Periodenzahl annähernd unabhängig ist und bei Verwertung der Resultate dieselbe unberücksichtigt lassen.

Bei Aufzeichnung der Kurven des Widerstands als Funktion der momentanen Stromdichte ergab sich ferner, dass man deutlich zwei Kurven erhält (Tafeln 19 und 20). Die Widerstände sind verschieden, je nachdem sie bei der einen oder bei der andern Richtung des Wechselstroms aufgenommen sind. Es zeigte sich also hier die Polarität, welche zu den im Kap. III behandelten Versuchen führte und durch diese bestätigt wurde. Für das Folgende soll jedoch von dieser Erscheinung abgesehen und nur Mittelwerte in Betracht gezogen werden.

Während die Art der Variation des Widerstands für beide effektiven Stromstärken vollständig gleich war, ist seine absolute Grösse in beiden Fällen verschieden. Sie ist von der effektiven Stromdichte

$$\frac{J_{eff}}{F} = s_w = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \sigma_t^2 . dt}$$

$\left(\frac{1}{T}\right.$ = Periodenzahl, σ_t = Momentanwert der Stromdichte$\left.\right)$ bedingt und es ergibt sich die interessante Thatsache, dass die mit Wechselstrom aufgenommenen Kurven der Widerstandsvariationen mit der Stromdichte von den mit Gleichstrom aufgenommenen bei der effektiven Stromdichte des Wechselstroms geschnitten werden [1]) und der Uebergangswiderstand bei den verschiedenen Momentanwerten des Wechselstroms um den durch die effektive Stromstärke bedingten Mittelwert hin und her pendelt. Der Momentanwert des Widerstands für rasch variierende Stromdichte ist demnach erstens durch die effektive Stromdichte $\sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \sigma_t^2 . dt}$ und zweitens durch deren Momentanwert σ_t bestimmt.

Um den Einfluss der Ringgeschwindigkeit auf diese Widerstandsvariation festzustellen, wurden Versuche bei Ringgeschwindigkeiten von 1,8, 6,7 und 8,00 m/Sek. gemacht (Tabelle 22, Tafel 22), welche ergaben, dass der Widerstand von der Geschwindigkeit bei rotierendem Ring annähernd unabhängig ist und diese auch auf die Variation mit der Stromdichte keinen Einfluss hat. Dagegen zeigte sich die merkwürdige Erscheinung, dass der Widerstand bei ruhendem Ring von der rasch variierenden Stromdichte unabhängig ist. Die Werte Tabelle 22, C und D sind aufgenommen, während die Kohle stets an der gleichen Stelle des Rings stand (für eine Versuchsreihe). Die kleinen Variationen erklären sich dadurch, dass bei ruhendem Ring der Widerstand durch die kleinsten Erschütterungen geändert wird. Man sieht jedoch, dass die momentane Stromdichte auf diese unregelmässigen Variationen keinen Einfluss hat. Das Konstantbleiben des Widerstands gibt sich namentlich auch dadurch zu erkennen, dass für höhere Momentanwerte der Stromdichte der Widerstand für ruhenden Ring viel grösser ist, als für rotierenden. Dies zeigte sich auch deutlich bei einem Versuch, der mit Rücksicht darauf angestellt wurde. Der Widerstand wurde bei rotierendem Ring für eine bestimmte Stellung des Kontaktgebers, also einen gegebenen Momentanwert der

---

[1]) Siehe Tafel 19 und 20.

Stromstärke bestimmt und dann der Antriebsmotor des Ringes ausgeschaltet, so dass dieser allmählich zur Ruhe kam. Stellte man den Kontaktgeber auf einen hohen Momentanwert der Stromdichte ein, so zeigte sich der Widerstand während des Auslaufens annähernd konstant, fing aber, nachdem der Ring zur Ruhe gekommen war, sofort an zu steigen. Dieses Verhalten zeigte sich bei sämtlichen diesbezüglichen Versuchen und in verschiedenen Ruhelagen des Rings. Eine dieser Messungen ist in Tabelle 22, E wiedergegeben. Die unregelmässigen Abweichungen rühren hier hauptsächlich davon her, dass der Ring in verschiedenen Lagen zur Ruhe kam und der Uebergangswiderstand stets an verschiedenen Stellen des Ringumfangs differiert. Der Unterschied zwischen Bewegung und Ruhe wurde noch bei Auslauf von Ringgeschwindigkeiten von 0,26 m/Sek. aus deutlich konstatiert.

Um die erwähnte Abhängigkeit des Widerstands von der effektiven Stromdichte genauer nachzuprüfen, wurden zum Abschluss der experimentellen Untersuchungen noch Messungen über den Wechselstromwiderstand der Kontaktstelle vorgenommen. Da sich bei Aufnahme der Strom- und Spannungskurven gezeigt hatte, dass an der Kontaktstelle keine Phasenverschiebung vorhanden ist, wurde der Uebergangswiderstand für Wechselstrom direkt als Quotient der Effektivwerte von Spannung und Stromstärke berechnet. Die Kohlen waren auf einen Ring aufgesetzt, auf welchem ausserdem eine kleine Kontaktbürste zur Spannungsmessung schleifte. Es wurde ein Wechselstrom von 165 Perioden durch die Bürsten geschickt; ausserdem konnte auch Gleichstrom eingeleitet werden. Es wurde nun für verschiedene Stromdichten der Widerstand für Gleichstrom in beiden Richtungen und für Wechselstrom durch Strom- und Spannungsmessung ermittelt. Der effektive Spannungsabfall an der Kontaktstelle bei Durchgang von Wechselstrom wurde mit einem Spiegeldynamometer gemessen, die Stromstärke mit einem Hitzdraht-Ampèremeter.

Die Versuchsresultate sind in Tabelle 23 und auf Tafel 23 zusammengestellt. Es sind die für jede der beiden Kohlen, welche bei der Messung benutzt wurden, gefundenen Werte angegeben; dass der Widerstand der einen Kohle grösser ist, als der der andern, rührt von der Verschiedenheit des Auflagedrucks her; vielleicht lag auch die eine Kohle nicht vollständig auf. Auf das Ergebnis der Versuche hat dieser Umstand jedoch keinen Einfluss. Bei Stromdichten von unter 2 Amp./qcm wurden die Dynamometerausschläge zu klein, um genaue Ablesungen zuzulassen, und ein Instrument mit grösserer Empfindlichkeit war nicht vorhanden. Die für höhere Stromdichten

Tafel 23.

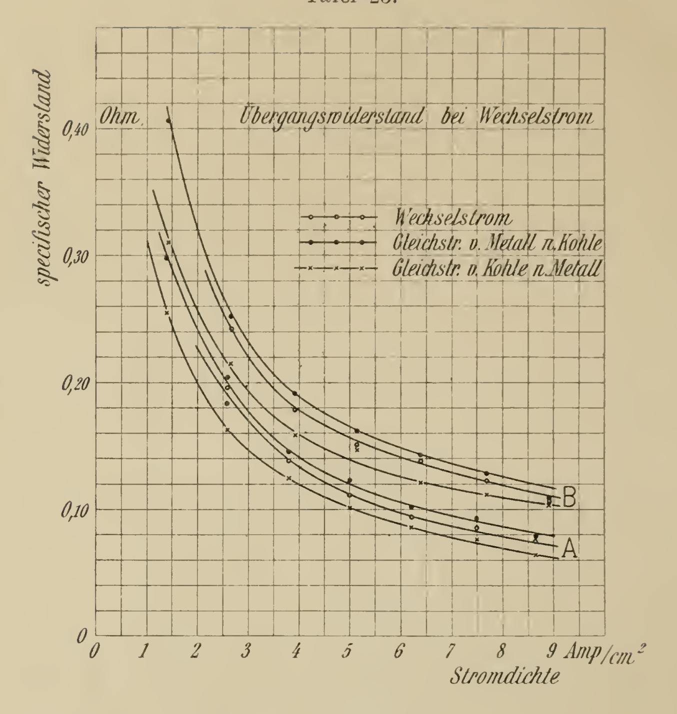


Tabelle 23 (Tafel 23).

Uebergangswiderstand bei Wechselstrom.

Kohle A. Kontaktfläche F = 4,12 qcm.
Kohle B. Kontaktfläche F = 4,00 „

Kohle A.

Stromdichte	Wechselstrom		Gleichstrom			
	Effektiver Spannungsabfall	Widerstand	Spannungsabfall		Widerstand	
			M. n. K.	K. n. M.	M. n. K.	K. n. M.
Amp./qcm	Volt	Ohm	Volt	Volt	Ohm	Ohm
2,6	0,51	0,196	0,53	0,42	0,204	0,162
3,8	0,525	0,138	0,55	0,47	0,145	0,124
5,0	0,55	0,11	0,61	0,50	0,122	0,100
6,22	0,575	0,0925	0,63	0,53	0,101	0,0852
7,5	0,63	0,084	0,69	0,56	0,092	0,0748
8,76	0,65	0,075	0,68	0,54	0,0785	0,0623
2,62	0,48	0,183	—	—	—	—

Kohle B.

Stromdichte	Wechselstrom		Gleichstrom			
	Effektiver Spannungsabfall	Widerstand	Spannungsabfall		Widerstand	
			M. n. K.	K. n. M.	M. n. K.	K. n. M.
Amp./qcm	Volt	Ohm	Volt	Volt	Ohm	Ohm
2,68	0,65	0,242	0,675	0,575	0,252	0,215
3,93	0,70	0,178	0,75	0,62	0,191	0,158
5,15	0,77	0,150	0,83	0,75	0,161	0,146
6,4	0,88	0,138	0,91	0,77	0,142	0,120
7,7	0,93	0,121	0,96	0,85	0,125	0,110
8,92	0,95	0,1065	0,96	0,90	0,108	0,101
2,7	0,655	0,242	—	—	—	—

erhaltenen Werte genügen jedoch vollständig, um das Verhalten des Uebergangswiderstands zu erkennen. Es ergibt sich, dass der Widerstand für Wechselstrom etwa gleich dem Mittelwert des Widerstands für Gleichstrom beider Stromrichtungen ist. Inwiefern hierdurch die Versuchsresultate, welche durch die Aufnahme der Wechselstromkurven erhalten worden waren, bestätigt und verallgemeinert werden, soll erst im folgenden Kapitel dargelegt werden.

V. Anwendungen der Versuchsergebnisse.

1. Berechnung des Spannungsabfalls unter den Bürsten. Es erübrigt nun noch, die bisher gegebenen Versuchsresultate in einfache Formen zu bringen, so dass dieselben für die Anwendung geeigneter und handlicher werden.

Für genauere Rechnungen kann man sich der aufgenommenen Kurven bedienen oder auch für dieselben Gleichungen aufstellen. Die Abhängigkeit des Uebergangswiderstands pro Quadratcentimeter von der Stromdichte lässt sich am genauesten durch die Gleichungen

$$w = \frac{A}{s^B} \quad \text{oder} \quad w = \frac{A}{s + B} + C,$$

wo A, B, C Konstante sind, darstellen. Für Stromdichten über 2 Amp./qcm geben die Formeln

$$w = \frac{A}{s + B} \quad \text{und} \quad w = \frac{A}{s} + B$$

gute Annäherungen, von denen namentlich die letzte in der Anwendung recht bequem ist[1]).

Mit grosser Genauigkeit zu rechnen hat jedoch bei dem vorliegenden Fall keinen Wert, da der Uebergangswiderstand, wie in der Einleitung ausgeführt wurde, ausser der Stromdichte noch von einer ganzen Reihe von Faktoren beeinflusst wird, und diese sich auf keinen Fall alle berücksichtigen lassen. Infolge davon können die Versuchsergebnisse mit einer Kohlensorte immer nur mit gewisser Annäherung allgemein für diese Sorte verwendet werden. Es sei nur daran erinnert, dass, sowie der Kollektor nicht genau rund läuft und Schwingungen der Bürsten auftreten, erhebliche Variationen des Widerstands gegenüber ruhigem Lauf entstehen, welche sich natürlich niemals vorher bestimmen lassen. Es wird daher genügen, für jede Sorte Mittelwerte zu finden, welche gewisse Anhaltspunkte geben und überschlägliche Berechnungen gestatten. Aus diesem Grunde wird man auch die Messungen an Ringen annähernd für Kollektoren als gültig annehmen können, allenfalls kann man eine kleine Erhöhung der Werte vornehmen.

Es hat sich nun bei den Versuchen mit Gleichstrom herausgestellt, dass von Stromdichten von etwa 2 Amp./qcm an der Spannungsabfall unter den Bürsten für alle Belastungen annähernd konstant bleibt, der Widerstand demnach der Stromdichte umgekehrt proportional ist. Man kann daher für die einzelnen Bürstensorten Mittelwerte des Spannungsabfalls aufstellen. Dieselben sind je nach der Härte des Bürstenmaterials verschieden. Es wurden als Werte des Spannungsabfalls E gefunden:

für sehr harte Kohlen . . .	E = 1,2	bis	1,5	Volt,
„ harte Kohlen	E = 1,1	„	1,2	„
„ weiche Kohlen	E = 0,7	„	1,0	„
„ sehr weiche Kohlen . . .	E = 0,45	„	0,6	„

je nach dem Auflagedruck.

Man kann diesen Spannungsabfall für jede Sorte leicht ermitteln, wobei jedoch stets zu beachten ist, dass die Messungen nur bei um-

---

[1]) Zur Ermittelung der Konstanten in dieser Gleichung benutzt man am einfachsten folgendes Verfahren: Durch eine kleine Umformung $w = \frac{A}{s} + B$, $w \cdot s - B \cdot s = A$ erhält man, da $w \cdot s = E$, $E - B \cdot s = A$, die Gleichung einer Geraden. Man trägt nun die Werte des Spannungsabfalls E, welche man gemessen hat, als Funktion von s in ein Koordinatensystem ein und erhält in dem Abschnitt auf der E-Achse A und als Tangente des Neigungswinkels der Geraden B.

auflaufenden Stromabnehmern vorgenommen werden dürfen, da sich sonst unrichtige Werte ergeben. Auch sollten die Versuche an möglichst rundlaufenden Kollektoren oder Ringen vorgenommen werden, da sonst die Bürstenschwingungen, deren Einfluss ja in jedem speziellen Fall wieder gänzlich verschieden sein kann, Fehler in das Resultat bringen können. Ist die Härte der Kohle nicht bekannt, so kann man für die gewöhnlichen Sorten bei überschläglichen Rechnungen vielleicht den Spannungsabfall von 1 Volt als Mittelwert annehmen. Der spezifische Uebergangswiderstand wird dann gleich dem reziproken Wert der Stromdichte, der Gesamtwiderstand einer Bürste gleich der reziproken Stromstärke. Die Werte, welche diese Faustregel ergibt, sind in Tafel 17 als Kurve XI eingetragen.

2. Uebergangswiderstand und Kommutation. Wie am Eingang von Kapitel IV erwähnt ist, wurden die dort beschriebenen Versuche mit Wechselstrom speziell mit Rücksicht auf die Kommutation vorgenommen. Wenn wir nun die Resultate jener Messungen auf diesen Vorgang anwenden, sind wir uns wohl bewusst, dass die Verhältnisse, welche hier in Betracht kommen, mit den Bedingungen, unter welchen die Versuchsergebnisse gewonnen wurden, nicht exakt übereinstimmen. Immerhin lassen sich jedoch Anhaltspunkte gewinnen. Die folgenden Betrachtungen sollen also nur ein annäherndes Bild geben von dem Einfluss, welchen die durch die Versuche festgestellten Widerstandsänderungen bei der Kommutation ausüben.

Die Abhängigkeit des spezifischen Uebergangswiderstands (r) von der rasch variierenden Stromdichte (σ) lässt sich durch die Gleichung ausdrücken:

$$r = \frac{M}{\sigma} + N,$$

wobei M und N von der effektiven Stromdichte

$$\frac{J_w}{F} = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \sigma_t^2 . dt}$$

abhängige Konstanten bedeuten. Diese Formel gilt mit recht guter Annäherung von 1 Amp./qcm an; unter 1 Amp. liefert sie etwas zu hohe Werte. Eine mathematische Untersuchung zeigte jedoch, dass die Abweichungen vernachlässigt werden können.

Man kann nun diese Funktion $r = f(\sigma)$ in die von Prof. E. Arnold und Dr. G. Mie in der E.T.Z. 1899, Heft 5 gegebene Behand-

lung der Funkenbildung einführen. Der gesamte Uebergangswiderstand R einer Kontaktfläche F beträgt

$$R = \frac{r}{F} = \frac{M}{J} + \frac{N}{F}.$$

Die Kontaktflächen der beiden dort betrachteten Lamellen 1 und 2 sind

$$f_1 = F \cdot \frac{T - t}{T},$$

$$f_2 = F \cdot \frac{t}{T},$$

wobei unter F die Kontaktfläche sämtlicher auf einem Stift sitzenden Bürsten, unter T die Zeitdauer des Kurzschlusses einer Spule und unter t die Zeit vom Beginn des Kurzschlusses an verstanden ist.

Hieraus ergibt sich der Widerstand gegen die ablaufende Lamelle

$$r_1 = \frac{M}{i_1} + \frac{N}{f_1} = \frac{M}{J + i} + \frac{N}{F} \cdot \frac{T}{T - t}$$

(i_1 = Stromstärke der ablaufenden Lamelle = $J + i$,
J = Stromstärke eines Armaturstromzweiges,
i = Stromstärke der kurzgeschlossenen Spule zur Zeit t)

und der Widerstand gegen die auflaufende Lamelle

$$r_2 = \frac{M}{i_2} + \frac{N}{f_2} = \frac{M}{J - i} + \frac{N}{F} \cdot \frac{T}{t}.$$

Führt man diese Werte in die allgemeine Gleichung der Kommutation (Gleichung 3, E.T.Z. 1899, S. 98)

$$L \cdot \frac{d\,i}{d\,t} + f(t) + R \cdot i + \frac{R_1 \cdot T}{T - t}(J + i) - R_1 \cdot \frac{T}{t}(J - i) = 0$$

ein, so erhält man

$$L \cdot \frac{d\,i}{d\,t} + f(t) + R\,i + \left(\frac{M}{J + i} + \frac{N}{F} \cdot \frac{T}{T - t}\right)(J + i)$$

$$- \left(\frac{M}{J - i} + \frac{N}{F} \cdot \frac{T}{t}\right)(J - i) = 0,$$

$$L \cdot \frac{d\,i}{d\,t} + f(t) + R \cdot i + M + \frac{N}{F} \cdot \frac{T}{T - t} \cdot (J + i) - M - \frac{N}{F} \cdot \frac{T}{t}(J - i) = 0.$$

M hebt sich also heraus und die Gleichung ist wieder in die ursprüngliche Form zurückgeführt, nur dass an Stelle des dort genannten R_1 $\frac{N}{F}$ getreten ist.

Der Uebergangswiderstand zerfällt durch die Einkleidung in die oben genannte Gleichung $r = \frac{M}{\sigma} + N$ gewissermassen in zwei Teile, einen konstanten N und einen mit der Stromdichte variablen $\frac{M}{\sigma}$. Der durch den variablen Teil bewirkte Spannungsabfall ist bei beiden Lamellen gleich und hebt sich auf; man braucht also bei der weiteren Rechnung denselben nicht zu berücksichtigen und sämtliche Resultate bleiben unverändert, nur tritt überall an Stelle von R_1 $\frac{N}{F}$.

Es handelt sich also noch um Feststellung der Grösse N. Die am Ende von Kapitel IV beschriebenen Versuche über den Wechselstromwiderstand haben nun ergeben, dass dieser gleich dem Gleichstromwiderstand und also auch in gleicher Weise wie dieser von der Stromdichte abhängig ist. Inwiefern sich dies in der Grösse des Gliedes N der Gleichung $r = \frac{M}{\sigma} + N$ äussern muss, mag folgende Ueberlegung zeigen:

Mit Hilfe der angeführten Gleichung kann man für jede effektive Stromdichte s_{eff}, wenn M und N für sie gegeben sind, den Wechselstromwiderstand pro Quadratcentimeter w_w berechnen:

$$w_w = \frac{E_{eff}}{J_{eff}} \cdot F = \frac{E_{eff}}{s_{eff}} = \frac{\sqrt{\frac{2}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} e_t^2 \cdot dt}}{s_{eff}},$$

$$e_t = i_t \cdot \frac{r_t}{F} = \sigma_t \cdot r_t = \sigma_t \left(\frac{M}{\sigma_t} + N\right) = M + N \cdot \sigma_t,$$

$$\int_0^{\frac{T}{2}} e_t^2 \, dt = \int_0^{\frac{T}{2}} (M + N \cdot \sigma_t)^2 \cdot dt$$

$$= \frac{T}{2} \cdot \left(M^2 + N^2 \cdot \sigma_{eff}^2 + 2 M \cdot N \cdot \sigma_{eff} \cdot \frac{\sigma_{mittel}}{\sigma_{eff}}\right).$$

Diese Integration gilt für beliebige Kurvenform des Wechselstroms. Man wird nun, da das Glied $2 M N \cdot \sigma_{eff} \cdot \frac{\sigma_{mittel}}{\sigma_{eff}}$ auf das Resultat nur

geringen Einfluss hat, den reziproken Formfaktor $\frac{\sigma_{mittel}}{\sigma_{eff}}$ ohne grossen Fehler gleich 1 setzen dürfen. Dann erhält man

$$\int_0^{\frac{T}{2}} (M + N \,.\, \sigma_t)^2 \,.\, d\,t = \frac{T}{2} \,.\, (M + N \,.\, \sigma_{eff})^2,$$

und der spezifische Wechselstromwiderstand wird gleich

$$w_w = \frac{M + N \,.\, \sigma_{eff}}{s_{eff}}.$$

Da s_{eff} und σ_{eff} numerisch gleich sind, ergibt sich als Endresultat

$$w_w = \frac{M}{\sigma_{eff}} + N,$$

wobei M und N Werte sind, die für jeden Effektivwert der Stromdichte verschieden sein können.

Aus diesem Resultate folgt, dass der spezifische Wechselstromwiderstand $w_w = \frac{E_{eff}}{J_{eff}} \,.\, F$, der sich aus der Messung der Effektivwerte von Spannungsabfall und Stromstärke ergibt, annähernd gleich dem Widerstand sein muss, der bei der Aufnahme von Strom- und Spannungskurven für den Momentanwert der Stromdichte σ_{eff} gefunden wurde. Da nun der Wechselstromwiderstand mit dem Gleichstromwiderstand übereinstimmt, müssen sich die Widerstandskurven für rasche Variation der Stromdichte mit den Gleichstromkurven bei der effektiven Stromdichte schneiden, wie es ja auch die Versuche gezeigt haben (Tafel 19 und 20).

Wir können nun die Ergebnisse der Messungen mit Gleichstrom hier anwenden und für höhere Stromdichten den effektiven Spannungsabfall $E_{eff} = w_w \,.\, s_{eff}$ konstant setzen. Wir erhalten dann

$$w_w \,.\, s_{eff} = M + N \,.\, \sigma_{eff} = \text{Konstant},$$
$$N \,.\, \sigma_{eff} = \text{Konstante} - M.$$

Wie bereits erwähnt, ist N ein von den Momentanwerten der Stromdichte unabhängiger Wert, dem sich der Widerstand für höhere Stromdichten asymptotisch nähert; $N \,.\, \sigma_{eff}$ ist der Spannungsabfall, den dieser Teil hervorruft. $\frac{M}{\sigma}$ ist der mit der Stromdichte variable Teil des Widerstands, welcher einen für jeden Effektivwert derselben konstanten Spannungsabfall M bewirkt. Dieser letztere tritt jedoch gegen

den erst erwähnten zurück; eine Aenderung von M für verschiedene effektive Stromdichten wird daher das Resultat verhältnismässig wenig beeinflussen und man kann $N \cdot \sigma_{eff}$ annähernd konstant setzen. Die Thatsache, dass die Momentanwerte des Widerstands bei rasch variierender Stromdichte auch von der effektiven Stromdichte bedingt werden, wird sich also hauptsächlich durch eine Veränderung von N mit der effektiven Stromdichte zeigen und diese Grössen werden einander annähernd umgekehrt proportional sein.

Dieses Verhalten können wir auch deutlich aus den Gleichungen ersehen, welche die Versuche ergeben haben. Die Messungen wurden bei effektiven Stromdichten von 4,42 und 6,1 Amp./qcm vorgenommen. Für $s_{eff} = 4{,}42$ ist im Mittel für beide Stromrichtungen

$$r = \frac{0{,}17}{\sigma} + 0{,}166,$$

für $s_{eff} = 6{,}1$ Amp./qcm

$$r = \frac{0{,}2}{\sigma} + 0{,}122.$$

Im ersten Falle erhalten wir

$$N \cdot s_{eff} = 0{,}166 \cdot 4{,}42 = 0{,}734,$$

im zweiten Falle

$$N \cdot s_{eff} = 0{,}122 \cdot 6{,}1 = 0{,}745.$$

Nun ist die Ermittlung der Grösse $N \cdot s_{eff}$ ziemlich umständlich, während sich der Spannungsabfall für Gleichstrom viel leichter ermitteln lässt. Dieser letztere ist um das Glied M grösser als $N \cdot s_{eff}$, welches in den angeführten Gleichungen nur etwa den vierten Teil von $N \cdot s_{eff}$ beträgt; es wird daher in vielen Fällen erlaubt sein, unter Vernachlässigung des Gliedes M einfach mit dem für Gleichstrom gefundenen Spannungsabfall zu rechnen.

VI. Ursachen der Widerstandsänderung.

Es ergeben sich, wie man sieht, beim Stromübergang zwischen Kohlenkontakten und Stromabnehmern eine ganze Reihe merkwürdiger Erscheinungen und Eigenschaften des Uebergangswiderstands. Bei einem Versuch, dieselben zu erklären, liegt es nahe, zuvörderst an Wärmewirkungen zu denken, und das Sinken des Widerstands einem negativen Temperaturkoëffizienten zuzuschreiben. An der Uebergangsstelle befindet sich ein Gemisch von Kohlenteilchen und Metalloxyd; im allgemeinen wird auch die Ringoberfläche eine leichte Oxydschicht

tragen. Wir haben demnach hier lauter Stoffe von geringer Leitfähigkeit und negativem Temperaturkoëffizienten [1]), und es ist wohl zu erwarten, dass mit steigender Temperatur der Widerstand fallen wird.

An der Uebergangsstelle wird die Stromenergie und der Reibungseffekt in Wärme umgewandelt. Ferner hat jeder unter die Kohle gelangende Teil der Ringoberfläche eine bestimmte Temperatur und diese wird beim Passieren der Kontaktstelle um einen gewissen Betrag erhöht, welcher der in diesem Augenblick in Wärme umgewandelten Energiemenge entspricht. Nachdem dann das Ringelement die Kohle verlassen hat, wird es einen Teil seiner Wärme abgeben, bis es wieder unter eine Kontaktstelle gelangt. Unter dem Einfluss von Abkühlung und Erwärmung wird sich daher für jeden zugeführten Arbeitsbetrag eine bestimmte Ringtemperatur einstellen, die jedoch an den einzelnen Stellen des Ringumfangs etwas variiert; am niedrigsten ist sie an der Stelle des Rings, die jeweils gerade vor der Kohle steht, am höchsten unter der Kohle selbst. Die Temperatur der Uebergangsstelle hängt demnach ab erstens von der Ringtemperatur und zweitens von der in jedem Augenblick an der Kontaktstelle in Wärme umgesetzten Arbeit.

Hierdurch erklärt sich die in Kapitel II geschilderte Erscheinung, dass bei Aenderung der Stromdichte der Widerstand, welcher sich sofort nach Einstellung einer neuen Stromdichte ergibt, von der vorhergehenden abhängig ist. Geht man von einer hohen Stromdichte zu einer niederen über, so ist die Ringtemperatur anfangs grösser, als der niederen Stromdichte entspricht; der Ring wird sich aber allmählich abkühlen; der Widerstand wird daher anfangs kleiner sein und dann langsam steigen. Das Umgekehrte wird beim Uebergang von niederen Stromdichten zu höheren eintreten; der Widerstand wird demnach hier fallen. Auch das allmähliche Sinken des Widerstands nach dem Anlassen der Maschine erklärt sich durch Wärmewirkungen, da die Temperatur von Ring und Kohle nach dem Anlaufen infolge der Reibung steigt. Hauptsächlich aber spricht der Umstand, dass der Widerstand für Wechselstrom und Gleichstrom das gleiche Verhalten zeigt und für gleiche effektive Stromdichte übereinstimmt dafür, dass hier Wärmewirkungen eine Rolle spielen, da gerade die entwickelte Wärmemenge für beide Stromarten gleich ist. Bei rascher Variation werden wir an der Uebergangsstelle ebenfalls Variationen der Temperatur mit der Stromdichte haben, wie man aus dem analogen Verhalten des Wechselstromlichtbogens schliessen kann, bei dem ja diese

---

[1]) Temperaturkoëffizienten von Metalloxyden. E.T.Z. 1900, S. 675.

Temperaturschwankungen direkt an den Aenderungen der Lichtintensität wahrgenommen werden können.

Auf Grund dieser Beobachtungen wird man wohl annehmen dürfen, dass ein Teil der Variationen des Uebergangswiderstands auf Aenderungen der Temperatur der Uebergangsstelle zurückzuführen ist. Jedoch genügen diese nicht, um das Verhalten desselben vollständig zu erklären. Hierfür erscheint besonders der Grund ausschlaggebend, dass die Abhängigkeit des Widerstands auch noch bei so kleinen Stromdichten auftritt, dass hier eine entsprechende Aenderung der Temperatur ausgeschlossen erscheint. Die durch die Reibung erzeugte Wärme überwiegt nämlich hier vollständig und wird die Temperatur bestimmen. Die kleinen Aenderungen derselben, die von der Variation der Stromarbeit herrühren, können keinen Einfluss ausüben. Auf Tafel 24 sind die Ergebnisse von Messungen mit sehr kleinen Stromdichten aufgetragen und in Tabelle 24 die zugehörigen Daten gegeben und jeweils auch die entsprechende Stromwärme absolut und in Prozenten des Reibungseffekts angegeben.

Tabelle 24 (Tafel 24).

Kohlensorte V.

Kohle A. G = 0,369 kg. F = 3,10 qcm. v = 6,2.
Kohle B. G = 0,495 „ F = 3,10 „ v = 6,2.

Reibungseffekt A. $R_A = 9{,}81\ G \,.\, v \,.\, \rho = 9{,}81 \,.\, 0{,}369 \,.\, 6{,}2 \,.\, 0{,}2$ Watt = 4,5 Watt.
Reibungseffekt B. $R_B = 9{,}81 \,.\, 0{,}495 \,.\, 6{,}2 \,.\, 0{,}2$ Watt = 6,0 Watt.

I. Stromrichtung: Metall nach Kohle.
II. Stromrichtung: Kohle nach Metall.

Kohle A.

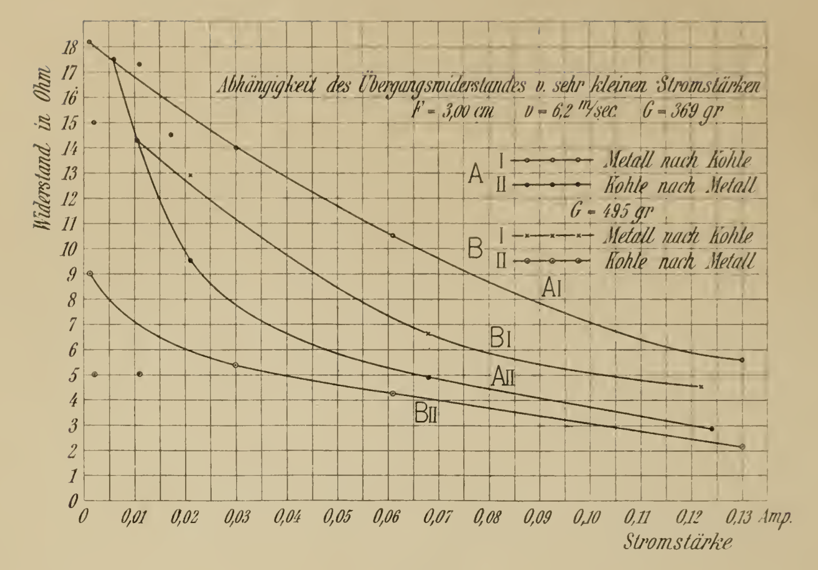
I.

J Amp.	E Volt	W Ohm	Stromwärme J^2W absolut	Stromwärme J^2W in % von R
0,13	0,72	5,53	0,0815	1,8
0,061	0,64	10,5	0,039	0,85
0,030	0,42	14,0	0,0126	0,28
0,0172	0,25	14,5	0,0043	0,096
0,011	0,19	17,3	0,00209	0,046
0,002	0,03	15,0	0,00006	0,013
0,0011	0,02	18,2	0,000022	0,00049

II.

J Amp.	E Volt	W Ohm	Stromwärme J^2W absolut	Stromwärme J^2W in % von R
0,006	0,105	17,5	0,00063	0,014
0,0105	0,15	14,3	0,00157	0,035
0,021	0,20	9,5	0,0042	0,093
0,068	0,33	4,85	0,0225	0,5
0,124	0,35	2,82	0,0436	0,96

Tafel 24.



Kohle B.

I.

J Amp.	E Volt	W Ohm	Stromwärme J^2W absolut	Stromwärme J^2W in % von R
0,006	0,07	11,6	0,000042	0,0007
0,0105	0,15	14,3	0,00157	0,0262
0,021	0,27	12,8	0,00566	0,0945
0,068	0,45	6,6	0,0306	0,51
0,124	0,57	4,5	0,0706	1,18

II.

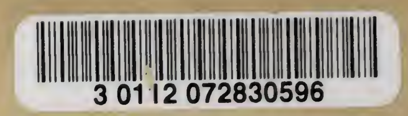
J Amp.	E Volt	W Ohm	Stromwärme J^2W absolut	Stromwärme J^2W in % von R
0,13	0,275	2,11	0,0358	0,6
0,061	0,26	4,26	0,0159	0,266
0,030	0,16	5,34	0,0048	0,08
0,0172	0,10	5,81	0,0017	0,0283
0,011	0,055	5,00	0,000605	0,0101
0,002	0,01	5,00	0,00002	0,00033
0,0011	0,01	9,1	0,000011	0,00018

Das Verhalten des Uebergangswiderstands lässt sich demnach allein durch Wärmewirkungen nicht erklären; es muss ausserdem noch ein anderer Einfluss wirksam sein. Aus den bisherigen Versuchen lässt sich jedoch über die Art dieser Einwirkung kein einheitliches, widerspruchloses Bild gewinnen.

Zum Schlusse seien noch einige Fälle erwähnt, bei denen der Widerstand in verschiedener Hinsicht analoges Verhalten, wie das betrachtete, zeigt. So verhält sich der Widerstand von dünnen Schichten dielektrischer Substanzen ganz ähnlich wie der Kontaktwiderstand.

(Walter Leick, Ueber die Leitung der Elektrizität durch dünne Schichten dielektrischer Substanzen. Wied. Ann. Bd. 66, S. 1107 ff.) Der Widerstand nimmt mit wachsender Stromdichte in gleicher Weise ab, und auch in anderen Beziehungen stimmen die beiden überein. Eine Begründung für das Verhalten konnte auch dort nicht gegeben werden.

Besonders auffallend ist die Analogie der Eigenschaften des Uebergangswiderstands mit dem Widerstand des elektrischen Lichtbogens. Die Abhängigkeit von der Stromstärke ist bei beiden vollkommen gleicher Art, und ebenso zeigt sich bei Lichtbogen zwischen Kohlen und Metallen eine Polarität. Hier ist der Widerstand bei der Stromrichtung Metall nach Kohle der kleinere, die Polarität ist also gleich der des Uebergangswiderstands bei ruhendem Ring.


3 0112 072830596